

Vertrauliche Dienstsache

Vertrauliche Dienstsache			
Reg.-Ber.	Lfd. Nr.	Jahr	Ausf. Nr.
6212	43	69	1

Dissertationsschrift:

Anordnung zur Erzeugung von extrem niedrigen
Geschwindigkeiten hoher Konstanz und Homogenität
mit einem optisch kontrollierten thermohydraulischen
Bewegungssystem

gelöscht: Februar/3.7.75

Vertrauliche Dienstsache			
Reg.-Ber.	Lfd. Nr.	Jahr	Ausf. Nr.
6212	2	70	7

angefertigt von:

Ralf Riebel FEBF 8



Anordnung zur Erzeugung von extrem niedrigen
Geschwindigkeiten hoher Konstanz und Homoge-
nität mit einem optisch kontrollierten thermo-
hydraulischen Bewegungssystem

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor - Ingenieurs

eingereicht bei der
Fakultät für Ingenieurwissenschaften
der Technischen Hochschule Ilmenau

vorgelegt von Dipl.-Ing. Ralf Riebel

Dekan: Prof.Dr.Ing. K.Frielinghaus

Gutachter: Prof.Dr.Ing. P.Michelsson

Gutachter: Prof.Dr.Dr.h.c. P.Görlich

Gutachter: Prof.Dr.Ing.Dr.oec.habil.R.Reichel

eingereicht am: **3.2.70**

öffentliche Verteidigung am:

Es ist mir ein Bedürfnis an dieser Stelle den Herren Prof. Dr. Dr. h. c. P. Görlich und Prof. Dr. Ing. P. Michelsson für fruchtbringende fachliche Diskussionen und die Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit zu danken. Ebenso gilt mein Dank dem Abteilungsleiter Herrn Dipl.-Phys. H. Vosahlo, der dieser Arbeit viel Interesse entgegen gebracht hat und Herrn Kurt Müller, der als Werkstattleiter einen großen Anteil an der Herstellung der Apparatur hat.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	6
1.1 Ableitung der Aufgabenstellung zur vorliegenden Arbeit aus der Mössbauerspektrometrie	7
1.2 Kernresonanzfluoreszenz	7
1.2.1 Die Linienbreite der Gammastrahlung bei Kernresonanzfluoreszenz	8
1.2.2 Der Mössbauereffekt	9
2. Aufgabenstellung	9
2.1 Das Mössbauerspektrum	9
2.2.1 Methoden der Energieverschiebung der Gammastrahlung zur Aufnahme eines Mössbauerspektrums	10
2.2.2 Bekannte Anordnungen zur Erzeugung der Relativbewegung zwischen Quelle und Absorber in Mössbauerspektrometern	12
2.2.2.1 Phasenmodulation	13
2.2.2.2 Anordnung der Quelle auf einer rotierenden Scheibe	13
2.2.2.3 Schräg rotierende Absorberscheibe	14
2.2.2.4 Zylinderförmiger Absorber	14
2.2.2.5 Kurvenscheibenanordnungen	15
2.2.2.6 Aufnahme des Spektrums auf einen bewegten Film	15
2.2.2.7 Präzisionsspindelantrieb	16
2.2.2.8 Elektrostriktiv oder piezoelektrisch anregbare Festkörperschwinger	17
2.2.2.9 Elektromagnetische Anordnung	17
2.2.2.10 Korrigierte Pendelbewegung	18
2.2.2.11 Pendel mit Fünffadenaufhängung	18
2.2.2.12 Lautsprecherprinzip	18
2.2.2.13 Prinzip "Hydraulic Master"	23
2.2.2.14 Hydraulischer Antrieb mit definiertem Druck und Strömungswiderstand	25
2.2.2.15 Aufnahme des Mössbauerspektrums durch Variation des Temperaturunterschiedes zwischen Quelle und Absorber	26
2.3.1 Formen der Spektrenabtastung in Mössbauerspektrometern	26

	Seite
2.3.1.1 Genauigkeitsbetrachtungen	27
2.3.1.2 Äußere Störung der Relativbewegung	28
2.3.2 Formen der Verknüpfung von Antriebs- und Nachweiselektronik	29
3. Versuch der Ableitung einer Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit oder konstanter Beschleunigung aus einem in der Natur gegebenen Vorgang	30
4. Diskussion der Möglichkeiten zur Erzeugung von Präzisionsfeinbewegungen (Abb. 4)	31
4.1 Auswertung des Vergleichs der bekannten Anordnungen zur Erzeugung der Relativbewegung zwischen Quelle und Absorber in Mössbauer-spektrometern für die Konzeption eines Bewegungssystems extrem kleiner Geschwindigkeiten	31
4.2 Festkörperausdehnung zur Feinbewegungserzeugung	32
4.2.1 Die thermische Ausdehnung	32
4.2.2 Magnetostriktive Bewegungserzeugung	33
4.2.3 Festkörperausdehnung durch elektrische Felder	33
4.2.3.1 Piezoelektrische Materialien	34
4.2.3.2 Ferroelektrische Materialien	35
5. Hydraulische Wandler zur Umsetzung einer Volumenausdehnung in eine geradlinige mechanische Bewegung ohne äußere gleitende Reibung	36
5.1.1 Untersuchung einer Bourdonfeder für Temperaturmessungen	36
5.1.2 Bourdonfedern mit mehreren Windungen	37
5.2 Druckwandlergefäße mit einer oder zwei elastischen Begrenzungsflächen	38
5.2.1 Vergleich der Druckwandlergefäßtypen	38
5.2.2 Balgenfederformen für homogene und lineare Feinbewegungen	39
5.2.3 Materialauswahl für Balgenfedern zur Erzeugung von Bewegungen mit schmalen Momentangeschwindigkeitsspektrum	42
5.2.4 Die Herstellung von PTFE-Federbälgen	44

	Seite
6.	Entwicklung einer geeigneten Methode der verzögerungsfreien Flüssigkeitserwärmung 44
6.1	Möglichkeiten der Flüssigkeitserwärmung 44
6.1.1	Erwärmung durch einen Heizkörper 45
6.1.2	Erwärmung durch Licht- und IR-Absorption 45
6.1.3	Erwärmung durch elektrische und magnetische Wechselfelder 46
6.1.4	Erwärmung durch unmittelbaren Durchfluß von elektrischem Strom durch die Flüssigkeit 48
6.2	Auswahl der Ausdehnungsflüssigkeit für die elektrolytische Zelle 49
6.3.1	Aufbau der elektrolytischen Zelle 50
6.3.2	Grundlegender Versuch zur NiCl_2 -Zelle 52
7.	Der elektronisch gesteuerte thermohydraulische Wandler 53
7.1	Dimensionierung der Kombination von Heizzelle und Federbalg 53
7.2.1	Leistungsaufnahme und Wirkungsgrad des vorliegenden elektromechanischen Wandlers 58
7.2.2	Festlegung der erforderlichen Konzentration des Elektrolyten 61
7.3	Dimensionierung der Wärmeabführung aus der Heizzelle 61
7.3.1	Luftkühlung der Heizzelle 61
7.3.2	Wärmeableitung mit luftgekühlten Peltierelementen 62
7.3.3	Wärmeableitung mit wassergekühlten Peltierbatterien 64
7.4	Elektromechanische und thermische Kennlinie des thermohydraulischen Wandlers 64
7.4.1	Das elektrische Verhalten der elektrolytischen Zelle 64
7.4.2	Die dynamischen Eigenschaften des thermohydraulischen Wandlers 65
8.	Variationsmöglichkeiten des thermohydraulischen Systems in Form und Anwendung zu dessen multivalenter Nutzung 67
9.	Die Kontrolle der erzeugten Feinbewegung 70
9.1	Meßfühleranordnung zur Kontrolle der erzeugten Bewegung 70

	Seite
9.1.1 Beschleunigungsmesser	70
9.1.2 Geschwindigkeitsdetektoren	73
9.1.3 Wegmesser	74
9.1.3.1 Dehnungsmeßstreifen	74
9.1.3.2 Fotodiskriminator	75
9.1.3.3 Laterales Fotoelement	75
9.1.3.4 Wegmesser auf der Grundlage des Halleffektes	75
9.1.3.5 Pneumatische Wegmessung	76
9.1.3.6 Differentialtransformator	76
9.1.3.7 Differentialkondensator	76
9.1.3.8 UHF-Wegmesser	79
9.2 Optisch-elektronischer, analog arbeitender Wegmesser	79
9.2.1 Prinzipielle Anordnung der mechanischen und optischen Elemente des Wegmessers	79
9.2.2 Die praktische Ausführung der beweglichen Gitterblende	81
9.2.3 Die Eigenschaften des optischen Wegmessers	81
9.2.4.1 Versuch zur Auswahl eines geeigneten Abbildungsobjektivs	83
9.2.4.2 Die Auflösung des ausgewählten Objektivs	84
9.2.4.3 Die Stabilität des mechanischen Aufbaues	85
9.2.4.4 Die Ausleuchtung der Blendengitterebene	86
9.2.4.5 Die Herstellung von Feldblenden- und Fenstergitter	87
9.2.4.6 Der Fotodetektor	88
10. Die elektronische Steuereinheit	92
10.1 Die elektronische Erzeugung der Führungsfunktion	92
10.2 Der Leistungsverstärker zur Ansteuerung der Heizzelle	94
10.3 Die Polwenderschaltung	95
10.4 Der Regelkreis	95
10.4.1 Prinzipielle Möglichkeiten der Regelung	95
10.4.2 Die Dimensionierung des Regelkreises	97
11. Meßmöglichkeiten der Qualität der erzeugten Bewegung	101

		Seite
11.1	Die Konstanz der Geschwindigkeit über den Bewegungsbereich	101
11.2	Die Messung der Breite des Momentangeschwindigkeitsspektrums	101
11.3	Beurteilung der Homogenität der Bewegung beim vorliegenden thermohydraulischen Bewegungssystem	102
12.	Zusammenfassung	103
13.	Anhang	105
14.	Literaturverzeichnis	107
15.	Verzeichnis der Abbildungen	126

1. Einleitung

Die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit über ein thermohydraulisches Feinbewegungssystem leitet sich aus der Mössbauerspektrometrie ab. Erstmals in der Technik wird im Bereich kleiner Geschwindigkeiten eine hohe Homogenität der Bewegung, d. h. ein besonders schmales Momentangeschwindigkeitsspektrum verlangt. Bisher wurden kleine Geschwindigkeiten hauptsächlich zur Feinpositionierung oder zur Vorschubeinstellung von Feinbearbeitungsmaschinen benötigt. Zur Erläuterung der Aufgabenstellung wird im Folgenden auf die Mössbauerspektrometrie näher eingegangen.

1.1 Ableitung der Aufgabenstellung zur vorliegenden Arbeit aus der Mössbauerspektrometrie

Im Jahre 1958 veröffentlichte R. L. Mössbauer eine Dissertation über Kernresonanzabsorption. Für seine Arbeiten auf dem Gebiete der Kernresonanzfluoreszenz und die Entdeckung und Interpretation des nach ihm benannten "Mössbauereffektes" erhielt er zusammen mit dem Amerikaner Hofstadter im Jahre 1961 den Nobelpreis. Die Arbeiten von Mössbauer bildeten die Grundlage einer neuen spektroskopischen Untersuchungsmethode in der Festkörperphysik, die es gestattet, eine Reihe von physikalischen und chemischen Parametern von Kristallen direkt zu messen, die bisher nur indirekt bestimmt werden konnten.

[1] [2] [3] [4]

1.2 Kernresonanzfluoreszenz

Bei der Kernumwandlung künstlicher radioaktiver Isotope entsteht das neue Isotop nicht nur in seinem energetischen Grundzustand, sondern in einem oder mehreren energiereichen Zuständen. Nach einer spezifischen mittleren Anregungszeit gehen die Kerne unter Abgabe eines Gammaquanten in den Grundzustand über. Die Energie dieses Gammaquanten entspricht einem diskreten Anregungsniveau des Isotopes. Deshalb können im Grundzustand befindliche Kerne des Isotopes solche Gammaquanten absorbieren und nach Ablauf der mittleren Anregungszeit wieder abgeben. Dabei verteilen sich die Richtungen der abgegebenen Quanten ungeachtet der Richtung der absorbierten Quanten gleichmäßig über alle Raumwinkel. Da bei dieser Kernfluoreszenz zwischen absorbiertem und emittiertem Quant praktisch kein Energieunterschied besteht, spricht man von Kernresonanzfluoreszenz. Der Nachweis der Resonanzstreuung wird bei Mössbauer [1] beschrieben.

1.2.1 Die Linienbreite der Gammastrahlung bei Kernresonanzfluoreszenz

Nach der Heisenbergschen Unschärferelation läßt sich mit dem Planckschen Wirkungsquant und der mittleren Lebensdauer des angeregten Zustandes die natürliche Linienbreite der Strahlung berechnen

$$\Gamma = \frac{h}{2\pi\tau} \quad (1)$$

Γ ist die Halbwertsbreite der Linie. Die Häufigkeit einer bestimmten Energie innerhalb der natürlichen Linienbreite wird durch die folgende Gleichung berechnet

$$w(E) = \frac{\frac{\Gamma}{2\pi}}{(E-E_0)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}} \quad (2)$$

Sie stellt eine Lorentz-Kurve dar.

Diese Darstellung gilt nur bei sehr tiefen Temperaturen. Sie wird in Abhängigkeit von der Temperatur verbreitert und verschoben. Die Absorptions- und Emissionslinien verschieben sich dabei entgegengesetzt.

Die Temperaturverbreiterung ist mit einer gleichzeitigen Abnahme des Anteiles der resonanzgestreuten Quanten von der Gesamtzahl der Quanten verbunden. Diese Tatsache wird in der Gleichung (4) durch den Debye-Waller-Faktor ausgedrückt.

$$f(T) = \exp\left(-\frac{E^2 \cdot 4\pi^2}{h^2 \cdot c^2} \cdot \langle x^2 \rangle\right) \quad (3)$$

$$w(E) = \frac{\frac{\Gamma}{2\pi} \cdot \exp\left(-\frac{E^2 \cdot 4\pi^2}{h^2 \cdot c^2} \cdot \langle x^2 \rangle\right)}{(E-E_0)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}} \quad (4)$$

Hierbei sind: c Geschwindigkeit des Gammaquants im Kristall

$\langle x^2 \rangle$ quadratischer Mittelwert der Auslenkung
eines Atoms aus der Ruhelage durch thermische Gitterschwingungen

1.2.2 Der Mössbauereffekt

Bei der Emission eines Gamma-Quanten erhält der emittierende Kern einen Rückstoß mit der Energie

$$E_R = \frac{e^2}{2 M c^2} \quad (5)$$

M = Masse des Atoms

Diese Rückstoßenergie geht dem emittierten Quant verloren. Das bedeutet eine Linienverschiebung und damit ein Ausbleiben von Resonanzfluoreszenz. Mössbauer stellte fest, daß unter bestimmten Bedingungen nicht das einzelne Atom, sondern der Kristall, in dem das emittierende Atom eingebettet ist, den Rückstoß aufnimmt. Aus der Formel (5) ist zu ersehen, daß sich die Rückstoßenergie dadurch erheblich verringert. Es tritt eine ausgeprägte Resonanzfluoreszenz auf. Dieser Effekt wird nach Mössbauer benannt.

Aus dem Debye-Waller-Faktor können die Bedingungen für das Auftreten des Mössbauereffektes errechnet werden. Es ergibt sich, daß der Mössbauereffekt nur bei Gammastrahlenenergien unter 100 keV und je nach Kristall unterhalb einer bestimmten Grenztemperatur zu beobachten ist.

2. Aufgabenstellung

2.1 Das Mössbauerspektrum

Der Absorber enthält Atome des gleichen Isotops wie die Strahlenquelle, die sich aber im nicht angeregten Zustand befinden und die auftreffenden Quanten resonanzstreuern können. Äußere Einflüsse z. B. chemische Bindungen verursachen Energieverschiebungen zwischen Emissions- und Absorptionslinien. Durch eine Relativbewegung zwischen Quelle und Absorber wird eine Dopplerverschiebung der Energie der Gammastrahlung erreicht. Dafür gilt die folgende Beziehung:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{v}{c} \quad (6)$$

Für die dopplerverschobene Linie gilt dann

$$w(E) = \frac{\frac{\Gamma}{2\pi} \cdot \exp\left(-\frac{E^2 \cdot 4\pi^2}{h^2 \cdot c^2} \cdot \langle x^2 \rangle\right)}{\left[E - E_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)\right]^2 + \frac{\Gamma^2}{4}} \quad (7)$$

Von den mehr als 60 bekannten Kernniveauübergängen verschiedener radioaktiver Isotope, bei denen der Mössbauereffekt möglich ist, ist der 58 keV-Übergang des Tb¹⁵⁹ mit einem Verhältnis natürliche Linienbreite zu Strahlungsenergie von $2,24 \cdot 10^{-10}$ eine der breitesten Linien. Die schmalste Linie hat der 93,5 keV-Übergang des Isotops Ag¹⁰⁷ mit $\Gamma/E = 7,7 \cdot 10^{-23}$. Es erscheint unmöglich zu sein, den Mössbauereffekt bei diesem Isotop mit einer der bisher bekannten mechanischen Anordnungen experimentell nachzuweisen. Die nächstbreiteren Linien zeigen die Übergänge 92 keV vom Zn⁶⁷ mit $\Gamma/E = 5,5 \cdot 10^{-16}$ und 6,25 keV von Ta¹⁸¹ mit $\Gamma/E = 1,1 \cdot 10^{-14}$. Mit diesen beiden Übergängen wurde der Mössbauereffekt bereits experimentell nachgewiesen. Die Darstellung der Anzahl der resonanzgestreuten Gamma-Quanten pro Zeiteinheit in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit zwischen Quelle und Absorber wird als Mössbauer-spektrum bezeichnet. Die Relativgeschwindigkeiten, die nötig sind, um die Halbwertsbreite der natürlichen Linie zu überstreichen, liegen für Tb¹⁵⁹ bei $v = 67$ mm/s; für Ag¹⁰⁷ bei $v = 2 \cdot 10^{-11}$ mm/s; für Zn⁶⁷ bei 0,2 μm/s und für Ta¹⁸¹ bei 3,2 μm/s. Um die schmalste experimentell aufnehmbare Linie mit mindestens 10 Punkten darzustellen, benötigt man eine minimale Relativgeschwindigkeit von 20 nm/s. Als obere Grenze der Relativgeschwindigkeiten zur Aufnahme eines Mössbauer-spektrums kann der Wert 600 mm/s angesehen werden.

[12] ... [22]

2.2.1 Methoden der Energieverschiebung der Gammastrahlung zur Aufnahme eines Mössbauerspektrums

Zur Energievariation der Gammastrahlung gibt es noch eine Reihe von Methoden, die sich aber zur Aufzeichnung eines für die Analyse geeigneten Spektrums nicht durchgesetzt haben. Sie

dienen teilweise für Spezialuntersuchungen bzw. für den Nachweis grundlegender Effekte:

1. Variation der Temperatur von Quelle und Absorber oder eines von beiden
2. Phasenmodulation der Gammastrahlung durch schnelles periodisches Eintauchen eines Keiles eines ausgesuchten Stoffes in den Strahlengang (in dem Stoff hat die Gammastrahlung eine möglichst weit von der in Luft vorhandenen abweichende Geschwindigkeit)
3. Frequenzmodulation, z. B. durch piezoelektrische Schwinger mit Hochfrequenz

Die Eigenarten der genannten Methoden bestehen in folgendem

Zu 1.:

Die Temperaturverschiebung ergibt sich zu

$$\Delta E = \frac{1}{2c^2} \cdot E \cdot C_L \cdot \Delta T \quad (8)$$

ΔE = Energieverschiebung

E = Energie der Strahlung

C_L = spezifische Wärme des Kristalls

T = Temperaturunterschied

c = Lichtgeschwindigkeit

Das mittlere Geschwindigkeitsquadrat errechnet sich zu

$$\langle v^2 \rangle = C_L \cdot \Delta T \quad (9)$$

Die Variation der Temperatur von Quelle und/oder Absorber anstelle einer Relativbewegung läßt sich nur dort benutzen, wo eine kleine Linienverschiebung erreicht werden soll und wo eine Temperaturvariation das Mössbauerspektrum nur unwesentlich verändert. Es ist weiterhin schwer, die Temperatur über die ganze Probe hinweg im Kryostaten ausreichend gleich zu

halten. Nach der Einstellung einer neuen Temperaturstufe muß eine genügend lange Zeit gewartet werden, bis ein Temperaturausgleich stattgefunden hat. Das macht einen beträchtlichen Teil der Gesamtmeßzeit des Spektrums aus, besonders dann, wenn die Proben sehr dünn sind und eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzen. Es werden hohe Anforderungen an die Einstellgenauigkeit und die Konstanz des Kryostaten gestellt.

[23] (Abschnitt IV, Band I) [24] ... [27]

Zu 2.:

In der Originalarbeit sind bereits die Vor- und Nachteile dieser Methode beschrieben. An die maßliche Genauigkeit und stoffliche Homogenität der Keile sowie ihre Anordnung auf einem Rad und die Konstanz der Geschwindigkeit desselben werden sehr hohe Anforderungen gestellt - noch dazu, wenn man bedenkt, daß sehr hohe Umfangsgeschwindigkeiten des Rades benötigt werden. [25]

Zu 3.:

Nicht immer liegen Quelle oder Absorber in einer solchen Form vor, daß sie in eine homogene Ultraschallschwingung versetzt werden können. Außerdem besitzen die meisten Ultraschallschwinger keine gleichmäßige Verteilung der Momentangeschwindigkeit über ihre aktive Oberfläche. Als Nachteil dieser Methode kann angesehen werden, daß die beiden Spektrenhälften für die negative und für die positive Relativgeschwindigkeit übereinandergeschrieben werden. [26] [27]

2.2.2 Bekannte Anordnungen zur Erzeugung der Relativbewegung zwischen Quelle und Absorber in Mössbauerspektrometern

In der Abb. 1 sind alle in der Literatur und in Firmenschriften beschriebenen Energievariationsformen aufgeführt, auch solche, die eine Energieverschiebung ohne mechanische

Relativbewegung zwischen Quelle und Absorber gestatten. Wegen der technischen Gegenüberstellung sind auch die letztgenannten Methoden in die nachfolgende Diskussion einbezogen worden.

2.2.2.1 Phasenmodulation

In der Tabelle steht die Phasenmodulation der Gammastrahlung an erster Stelle. In [8] Seite 256 bis 258 wird diese Methode beschrieben. Im Prinzip wird ein Methylmetacrylatkeil in den Strahlengang eingeschoben. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Gammastrahlung ist in dem genannten Stoff merklich geringer als in Luft. Die schnelle Veränderung der optischen Weglänge ist gleichbedeutend mit einer Relativbewegung zwischen Quelle und Absorber. Zur schnellen periodischen Wiederholung des Vorganges sind eine Anzahl möglichst gleichförmiger Keile auf der Peripherie eines Rades angebracht. In der beschriebenen Anordnung sind ca. 1500 Umdrehungen pro Minute nötig, um eine scheinbare Relativgeschwindigkeit von $40 \mu\text{m/s}$ zu erreichen. Fehler treten in dieser Anordnung dadurch auf, daß die Keile nicht absolut gleichförmig sind und nicht immer genau an der entsprechenden Stelle sitzen. Bei einer endlichen Dicke des Strahlenbündels sind besonders am Anfang und am Ende eines Keiles die Energieverschiebungen innerhalb des Bündels nicht gleichmäßig. Außerdem ist die Umfangsgeschwindigkeit über die Breite des Keiles nicht konstant. Weitere Fehler sind durch die Unwucht des Rades und die Drehzahlkonstanz des Rades abschätzbar. Die Erzeugung einer veränderlichen Energieverschiebung, die praktisch einer Relativbewegung mit konstanter Beschleunigung entspricht, ist durch die hohe Periodizität, mit der die einzelnen Keile in den Strahlengang treten, nicht möglich.

2.2.2.2 Anordnung der Quelle auf einer rotierenden Scheibe

Mit dem Kunststoffkeilrad ist die Methode verwandt, die Strahlenquelle an einem Punkt der Peripherie einer rotierenden Scheibe

anzubringen. Durch einen ~~elektrooptischen~~* Schalter wird die Zählapparatur immer dann eingeschaltet, wenn sich die Quelle nahezu direkt auf den Absorber zu bewegt. Außerdem sorgt ein Bleirohr dafür, daß der Absorber immer nur von der Strahlung getroffen wird, die innerhalb des ausgewählten Richtungsreiches liegt. Dadurch, daß sich die Quelle auf einer Kreisbahn bewegt, verbreitert sich das Energiespektrum. Fehler können sich weiterhin aus den mechanischen Erschütterungen durch Motor, Getriebe und Lager ergeben, die sich der Nominalgeschwindigkeit überlagern. Die effektive Meßzeit ist bei dieser Methode gering gegenüber der ganzen Betriebszeit des Gerätes. [1] und [23]
Seite 76 Bd I, [28]

2.2.2.3 Schräg rotierende Absorberscheibe

In [29] wird eine Anordnung beschrieben, bei der ein scheibenförmiger, fester Absorber schräg im Strahlengang rotiert, um die erforderliche Geschwindigkeitskomponente für die Dopplerverschiebung der Energie zu erzeugen. Hierbei muß die Absorberscheibe sehr homogen sein. Es können keine Pulver verwendet werden. Die Methode ist für den Fall geeignet, wo chemisch-physikalische Vorgänge in der Quelle untersucht werden.

2.2.2.4 Zylinderförmiger Absorber

Der vorher beschriebenen Anordnung ähnlich ist eine solche, wo der Absorber als Zylinder um die Quelle rotiert. Quelle und Detektor werden so um einen auf der Peripherie des Zylinders liegenden Punkt geschwenkt, daß verschiedene Relativgeschwindigkeiten eingestellt werden können. Der Zylinder darf nur sehr geringe Dickenschwankungen besitzen. Diese Anordnungen werden bei großen bis sehr großen Relativgeschwindigkeiten benutzt, wenn eine geeignete Form des Absorbers herstellbar ist. Die Konstruktion eines Universalgerätes ist auf dieser Basis nicht möglich. Die Erschütterungen des Antriebes sind regelungstechnisch nicht erfaßbar. Eine Bewegung mit konstanter Beschleunigung ist nicht möglich. [30]

*optisch-elektronischen

2.2.2.5 Kurvenscheibenanordnungen

Zu den Antrieben mit Elektromotor gehören auch die Anordnungen, wo die rotierende Bewegung mit Hilfe einer Kurvenscheibe und eines Gestänges in eine translatorische umgewandelt wird. Die einfachste Form ist die, daß ein Schlitten mit Federkraft an eine Kurvenscheibe angedrückt wird. Durch den veränderlichen Radius der Kurvenscheibe wird der Schlitten durch die Drehung derselben hin und her bewegt. Andere Varianten benutzen eine geradlinig geführte Schubstange, die an einem Ende einen Gleitschuh trägt, der in einer in eine Kreisscheibe eingefrästen Nut läuft. Inhomogenitäten der Geschwindigkeit entstehen durch Reibung (stick-slip-Effekt) und durch Motor- und Getriebeer-schütterungen. Sie können regelungstechnisch nicht korrigiert werden. Die Form der Bewegung und ihre Genauigkeit werden von den Eigenschaften (Präzision) der Kurvenscheibe bestimmt.

[31] ... [34]

2.2.2.6 Aufnahme des Spektrums auf einen bewegten Film

Die einfachste Anordnung zur Aufnahme eines Mössbauerspektrums wird in [35] beschrieben. Durch einen unter 2.2.2.5 geschilderten Kurvenscheibenantrieb wird der Absorber mit konstanter Beschleunigung in Bezug auf die Quelle positiv oder negativ bewegt. Die aus dem Absorber austretende Strahlung fällt durch eine Blende auf einen Filmstreifen, der mit konstanter Geschwindigkeit senkrecht zur Bewegungsrichtung des Absorbers und synchron zu diesem bewegt wird. Das Mössbauerspektrum ist als Schwärzungskurve auf dem Film registriert und kann fotometrisch abgenommen werden. Die Auflösung ist von der Filmlänge und der Spaltbreite abhängig. Dadurch, daß zwei verschiedene mechanische Bewegungen durchgeführt werden müssen und die Tatsache, daß man den Spalt wegen der geringen Impulsrate nicht beliebig schmal machen kann, ist die Auflösung eines solchen Spektrums begrenzt und am besten für Demonstrationen des prinzipiellen Effektes geeignet. Ein weiterer Nachteil der

Anordnung besteht darin, daß keine Energiefilterung der Gammastrahlung möglich ist. Als Untergrundschwärzung erscheinen auf dem Film die Strahlung anderer Niveauübergänge und Röntgenkontinua. In dem beschriebenen Ausführungsbeispiel wird Röntgenfilm für medizinische Zwecke benutzt. Dieser Film ist doppelseitig mit einer besonders dicken, strahlenempfindlichen Emulsion beschichtet. Dadurch ist die erreichbare Schärfe der Abbildung gering. Der Einfachheit halber wird der Absorber anstatt in einer parabolischen Weg-Zeit-Funktion in einer Sinusfunktion bewegt. Das Mössbauerspektrum wird entsprechend der Sinusfunktion verzerrt.

2.2.2.7 Präzisionsspindelantrieb

Zur Erzeugung von Normalgeschwindigkeiten zur Prüfung von Werkzeugmaschinen wird in [37], [38] eine Anordnung beschrieben, bei der ein stabilisierter Elektromotor über ein geräuscharmes Getriebe eine Meßspindel antreibt. Die axiale Geschwindigkeit der Meßspindel wird über ein federgelagertes Hebelsystem unteretzt. Das Gerät ist nicht für einen periodischen Betrieb geeignet. Man erreicht eine minimale Geschwindigkeit von ca. $3 \cdot 10^{-6}$ cm/s mit einem Fehler von ca. 2 %. Die Geschwindigkeit wurde durch eine digitale Weg-Zeit-Messung bestimmt. Dabei kann über das Spektrum der Momentangeschwindigkeiten (höherfrequente Inhomogenitäten der Bewegung) nichts ausgesagt werden. Das gleiche Prinzip der Bewegungserzeugung wird in [36] angewendet. Hier findet keine Untersetzung der Spindelgeschwindigkeit statt. Die Feinabstufung der Geschwindigkeit erfolgt über eine Stufenwelle, die durch Synchronmotoren angetrieben wird. Ein Teflonband überträgt die Drehbewegung des Stufenrades auf die Präzisionsspindel. Zur oszillationsarmen Lagerung der Spindel wird Teflon verwendet. Als Fehler wird eine Geschwindigkeit kleiner als 10^{-3} cm/s angegeben, was im wesentlichen durch die Teflonlagerung erreicht wurde. Es sind hier nur stufenweise diskrete Geschwindigkeiten einstellbar. Mit der in [38] beschriebenen Apparatur wird bei einem Geschwindigkeitsbereich von $5 \cdot 10^{-4} \dots 3 \cdot 10^{-2}$ cm/s bzw. $\dots 0,2$ cm/s eine Genauig-

keit von 1 % erreicht.

2.2.2.8 Elektrostriktiv oder piezoelektrisch anregbare Festkörperschwinger

Zur Erzeugung der Relativbewegung von Quelle und Absorber kann man eine Mössbauerquelle auf die schwingende Oberfläche eines elektrostriktiv oder piezoelektrisch anregbaren Kristalls oder polykristallinen Körpers aufbringen. Durch die sinusförmige Geschwindigkeitsänderung der Quelle wird der Gammastrahl moduliert. Es sind zusätzlich zur Emissionslinie, die bei ruhender Quelle beobachtet wird, noch zwei Nebenlinien vorhanden, die der Summe und der Differenz von Emissionsfrequenz und Bewegungsfrequenz entsprechen. Durch Veränderung der Bewegungsfrequenz kann ein Spektrum aufgenommen werden. Die Nachteile der Anordnung werden im Abschnitt 4.2.3 aufgeführt. [39] ... [44]

2.2.2.9 Elektromagnetische Anordnung

Von den elektrodynamischen Anordnungen zur Bewegungserzeugung für Mössbauerspektrometer ist in der Abb. 1 zuerst die elektromagnetische aufgeführt.

Bei diesem Bewegungssystem wird ein Weicheisenteil, das mittelbar die Quelle trägt, gegen eine Federkraft in einem gesteuerten Magnetfeld bewegt. Wegen der quadratischen Abhängigkeit der Kraft, die auf das Weicheisenteil ausgeübt wird, von dem Abstand desselben von den Magnetpolen, wird die Quelle sinusförmig mit kleinem Hub und dafür hoher Frequenz (Resonanzfrequenz) bewegt. Das Mössbauerspektrum muß nachträglich rechnerisch entsprechend entzerrt werden. Außerdem ist bei der hohen Bewegungsfrequenz die Zahl der Umschaltungen am Impulszähler und damit die Wahrscheinlichkeit systematischer Fehler groß. Die Vorteile bestehen darin, daß das System sehr kleine Abmessungen besitzt, in einem Kryostaten arbeiten kann und auf Grund des kleinen Hubes keine nachweisbaren Fehler infolge Änderung der Strahlungsgeometrie innerhalb einer Bewegungsperiode verursacht werden. Das in [45]

beschriebene System bestreicht einen Geschwindigkeitsbereich von $3 \cdot 10^{-3} \dots 2 \text{ cm/s}$.

2.2.2.10 Korrigierte Pendelbewegung

Schwingende Pendel bewegen sich sehr gleichförmig, was durch Pendeluhrten augenfällig demonstriert wird. Sie schwingen auf ihrer Resonanzfrequenz. Energieverluste werden durch eine phasenrichtige Einspeisung von mechanischen Impulsen ausgeglichen. In [46] wird eine solche Apparatur beschrieben. Eine stabile Eisenschiene ist auf einer Schneide gelagert. Die Schwingungsweite ist sehr klein gegenüber der Länge des Pendels. Man kann deshalb von einer nahezu geradlinigen Bewegung der unteren Kante des Pendels sprechen. Durch eine elektromagnetische Einrichtung wird das Pendel angetrieben. Das Spektrum wird stufenweise mit konstanter Geschwindigkeit aufgenommen. Durch ein Induktionssystem wird die Bewegung kontrolliert und über eine Rückführung geregelt. Das Pendel ist stark genug, einen kleinen Kryostaten zu tragen. Besondere Beachtung muß bei der Konstruktion eines solchen Systems der Neigung des Pendels zu inneren Schwingungen und zu Schwingungen der am unteren Ende befestigten Armaturen geschenkt werden.

2.2.2.11 Pendel mit Fünffadenaufhängung

In einer Diskussion wurde von einem Versuch gesprochen, ein Mössbauerbewegungssystem mit einem elektronisch angetriebenen und geregelten Pendel mit einer Fünffadenaufhängung ähnlich einer magnetischen Waage aufzubauen. Die Störanfälligkeit gegenüber Erschütterungen des Bodens und der Luft (Schall, Luftzug) soll unzulässig groß sein.

2.2.2.12 Lautsprecherprinzip

Unter der Bezeichnung Bewegungssystem nach dem Prinzip des dynamischen Lautsprechers faßt man eine ganze Reihe von

ähnlichen Anordnungen zusammen, die eine Spule, die sich in einem Magnetspalt bewegt, und zwei Zentrierfedern (Spider) gemeinsam haben. Oft wird noch ein gleichartiges System zur Erzeugung einer geschwindigkeitsproportionalen Spannung mit dem Antriebssystem gekoppelt. Folgende Varianten der einzelnen Elemente sind bekannt. Der Magnet kann sowohl ein Elektromagnet als auch ein Permanentmagnet sein. Der Strom des Elektromagneten muß stabilisiert werden. Das bedeutet einen zusätzlichen apparativen Aufwand und einen höheren Energieverbrauch. Die Magnetspalte für das Treibsystem und das Meßsystem können magnetisch in Reihe liegen. In einem Fall sind die Spalte konzentrisch angeordnet. Zum Erreichen einer streng stromproportionalen Kraft bzw. eines ortsunabhängigen Wirkungsgrades des Meßsystems ist eine gute Homogenität des Magnetspaltes (wenn die Spule kürzer als der Spalt ist) oder eine gute Homogenität der Spule (wenn die Spule länger als der Magnetspalt ist) notwendig. Die Homogenität des Magnetfeldes im Magnetspalt wird dadurch erreicht, daß das ferromagnetische Material, aus welchem der Magnetspalt gebildet wird, bis zur Sättigung magnetisiert ist. Der höchste Wirkungsgrad des Treibsystems wird erreicht, wenn der Magnetspalt länger als die Spule ist; der des Meßsystems ist dann am höchsten, wenn die Spule länger als der Magnetspalt ist. Zur besseren Entkopplung und zur Erzielung einer hohen Spaltinduktion ist es zweckmäßig, beide Spalte magnetisch nicht in Reihe zu schalten. Im allgemeinen werden beide Systeme mechanisch starr und schwingungsfrei miteinander verkoppelt. Es ist eine Apparatur bekannt, wo Treib- und Meßsystem durch zwei Lautsprecher gebildet werden und durch die eingeschlossene Luftsäule zwischen beiden Membranen miteinander gekoppelt sind. Diese Anordnung arbeitet wegen der Kompressibilität der Luft und der Erschütterungsempfindlichkeit besonders gegenüber Schallwellen in der Luft unbefriedigend. [48]

Zur Führung des Bewegungssystems in einer der drei räumlichen Koordinaten und zur Unterdrückung von Bewegungskomponenten in den anderen sind Geradführungen notwendig. Prinzipiell sind

Anordnungen mit gleitender, rollender und innerer Reibung in Federmaterialien denkbar. Bei den Bewegungssystemen nach dem Prinzip des dynamischen Lautsprechers wird die günstigste Variante v. Abb. 1, die Anordnung mit Zentrierfedern (auch Spider genannt) verwendet. Diese Spider sollen in Bewegungsrichtung hochelastisch und senkrecht dazu starr sein. Deshalb wird die Justierung der Antriebsspule im Magnetspalt erforderlich. Die Möglichkeit, daß Taumelschwingungen auftreten, die vom Meßfühler des Regelkreises (Geschwindigkeitsdetektorspule) nur ungenügend erfaßt werden können, muß durch die Art des Aufbaues verringert werden. Zu einem Bewegungssystem gehören mindestens zwei gleichförmige oder unterschiedliche Spider, die mit dem bewegten Teil zusammen eine Geradföhrung bilden. Es sind rechteckige, spiralige und runde Spiderformen bekannt. Besonders geeignet sind davon symmetrische Formen, die durch die kompensierende Wirkung je zweier korrespondierender Federarme eine Dezentrierung, Verdrehung bzw. Verkipfung des bewegten Teiles vermeiden. (Abb. 2)

Spider, die Platten mit konzentrisch eingeprägten Wellen darstellen (Wellenmembranen), sind für eine starre Zentrierung nicht geeignet. Der notwendige Durchmesser der Spider und damit die Länge der Federarme wird durch die maximal zulässige örtliche Biegung der Federarme bestimmt. Diese hängt wiederum von der Dicke des Federmaterials und dessen Struktur ab. Besonders bei Federmaterial, dessen Federeigenschaften durch Veränderung der Kristallstruktur der Oberfläche erzielt werden, läßt sich ein "mechanisches Rauschen", das durch abwechselndes Haften und Gleiten der Strukturelemente hervorgerufen wird, nachweisen. Bei der Untersuchung von 0,35 mm dicken Bronzespidern wurde bei der stufenweisen Einstellung kleiner Wege des Bewegungssystems ($40 \mu\text{m}$) eine Unsicherheit der Einstellung der Schritte von $\pm 35 \mu\text{m}$ festgestellt. Aus den zu erwartenden Fehlern der Größe der Treibspannung und des Meßmikroskops ergibt sich eine Meßgenauigkeit von ca. $\pm 1 \mu\text{m}$. Durch Überlagerung einer Niederfrequenz von ca. 400 Hz zur Treibspannung mit einer im Meß-

mikroskop noch nicht feststellbaren Amplitude konnte die Einstellunsicherheit auf den errechneten Wert reduziert werden. Die Brauchbarkeit der Spider wird weiterhin durch das Vorhandensein einer oder mehrerer ausgeprägter Resonanzfrequenzen (Verhältnis: Masse, Federkraft, Dämpfung) bestimmt.

Die Eigenschaften von Spidern aus Hartpapier stellen einen Kompromiß zu den genannten Forderungen dar.

Dieses Material hat aber einen anderen Nachteil. Es nimmt je nach Luftfeuchtigkeit unterschiedliche Mengen Wasser auf, was zu einer Formveränderung führt. Dabei können sich eine instabile Nullstellung des Systems (zwei Sprungstellen) und eine Dezentrierung ausbilden. Hartpapierspider wurden lange Zeit zur Zentrierung von Lautsprechermembranen verwendet. Neuerdings werden Wellenmembranen aus imprägniertem Gewebe bevorzugt.

Durch die Federkraft der Spider und die im System bewegte Masse ergibt sich eine mechanische Resonanzfrequenz. Dieses Verhalten des bewegten Teiles sowie die differenzierende Wirkung des Gebersystems in bezug auf das Antriebssignal werden bei der Dimensionierung des Regelkreises berücksichtigt. Verschiedene Anordnungen z. B. [10] S. 28 benutzen die differenzierende Wirkung des Geschwindigkeitsgebers für eine differenzierende Rückführung im Regelkreis, so daß die Weg-Zeitfunktion des Systems die integrierte Steuerfunktion des Endverstärkers darstellt. In [56] werden dem Endverstärker zur Korrektur der Eigenschaften des Bewegungssystems und zur Unterstützung des Regelkreises die erste und die zweite Ableitung der Antriebsfunktion mit bestimmten Amplituden hinzugefügt. Die Nullpunkttrift des Endverstärkers wird durch die Verwendung von Operationsverstärkern und durch Mikrolichtschraken ausreichend gering gehalten (z. B. Projekt Mössbauerspektrometer MS20, VEB Carl Zeiss Jena).

Die wesentlichen Vorteile der Bewegungssysteme nach dem Prinzip des dynamischen Lautsprechers bestehen darin, daß Antriebs- und Detektorsystem ausreichend linear und über längere Zeit konstant und wartungsfrei arbeiten, daß die Systeme jeder beliebigen, stetigen vorgegebenen Zeitfunktion bis zu einer bestimmten maxi-

malen Beschleunigung folgen und daß die Systeme über einen breiten Frequenzbereich in bezug auf Störschwingungen regelbar sind.

Die Grenze der Anwendung dieser Anordnungen liegt bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten. Mit einem System, das die Grenze des vertretbaren Aufwandes darstellt, wurden das Rauschsignal der Geberspule, die Erschütterungsempfindlichkeit (Mikrophonie und Gebäudeerschütterungen) und die Empfindlichkeit auf magnetische Einstreuungen von der Antriebsseite her durch 50 Hz- und durch 100 Hz-Streufelder der noch im Raum befindlichen elektromechanischen Geräte untersucht. Die Daten des Geschwindigkeitsgebersystems sind:

Magnetspaltdurchmesser	50 mm
Magnetspalthöhe	1 mm
Magnetspaltlänge	20 mm
Magnetische Feldstärke im Spalt	12 kG
Drahtlänge der Detektorspule	653 m
Widerstand der "	36,3 kOhm
Empfindlichkeit des Systems	1,06 $\frac{\text{mVs}}{\mu\text{m}}$

Gemessen wurden:

Rauschspannungsspitzen (Spule und Verstärkereingang):

Störpegel des DV 90 VEB Meßelektronik Berlin, bezogen auf den Eingang: ca. 0,6 mV_{ss}

Mittlere Einstreuung ca. 2 m entfernt stehender elektromechanischer Geräte: ca. 0,6 ... 2 mV_{ss}

Die Schallempfindlichkeit konnte nicht exakt gemessen werden. Eine normale Unterhaltung im Meßraum erzeugte eine mehr als 10fache Spannung gegenüber den oben genannten Störeffekten. Auch bei einer Arretierung auf der Antriebsseite zeigte das System diese Mikrophoniefekte. Das bedeutet, daß die Verbindung zwischen Antriebs- und Detektorsystem nicht starr genug ist. Diese Untersuchungen wurden in einem Kellerraum durchgeführt. Die Apparatur wurde auf einem auf dem Fundament des Hauses

ruhenden Betonsockel unter Zwischenlage von mehreren Schichten Filz, Schaumstoff und Schwammgummi auf einer Aluminiumplatte (20 mm stark) aufgebaut. Die Messungen wurden wegen der Gebäudeerschütterungen außerhalb der normalen Arbeitszeit durchgeführt. Die Frischluftanlage wurde dabei ausgeschaltet. Für Geschwindigkeiten im Bereich von 20 nm/s ist eine solche Anordnung nicht mehr brauchbar.

[47] ... [57]

2.2.2.13 Prinzip "Hydraulic Master"

Auf verschiedenen Gebieten der Technik werden Bewegungsprobleme hydraulisch gelöst. Dabei können Generator und Motor direkt oder unter Zwischenschaltung eines Druckreservoirs miteinander verbunden sein. In Abb. 1 ist zuerst die Anordnung mit direkter Kopplung von Generator und Motor angeführt. Ein kräftiger stabilisierter Synchronmotor bewegt einen Kolben mit einer meßtechnisch gut erfaßbaren Geschwindigkeit in einem Zylinder (sog. Hydraulic Master). Die Bewegung wird über die Flüssigkeit auf eine zweite Kolben-Zylinder-Anordnung übertragen. Durch die vorhandene hydraulische Untersetzung erzeugt der zweite Kolben die gewünschte langsame Bewegung. Die Anordnung ist mit mechanischen Motorgetrieben verwandt. Durch die Vibrationen des Motors und der Zahnstange läßt sich die Homogenität der Bewegung nicht über ein bestimmtes Maß hinaus steigern. Außerdem tritt durch das Gleiten der Kolben im Zylinder eine weitere Vibration auf. Diese Vibration wird durch ein abwechselndes Haften und Gleiten zwischen den Oberflächen von Kolben und Zylinder, den sog. stick-slip-Effekt, erzeugt. Durch die Oberflächenrauigkeit oder durch Adhäsion haften beide Oberflächen aneinander, und das Material wird bei der ausreichend langsamen Bewegung beider Flächen gegeneinander im Oberflächenbereich elastisch beansprucht. Wenn die Federkraft des elastisch verformten Materials die Haftreibung übersteigt, kommt es zu einem sprunghaften Rutschen, verbunden mit einem Rückgang der elastischen Verformung. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Haftreibung größer als die Gleitreibung ist. Das ist bei den meisten festen Stoffen und Schmiermitteln der Fall.

Durch die Materialeigenschaften: Bereich der elastischen Verformung, Federkraft, spezifische Masse und Charakter des Ausgleichsvorgangs (Zeitdauer, zeitlicher Verlauf, Dämpfung) und durch die Größe der Gleitreibung wird die Weg-Zeit-Funktion der überlagerten Bewegung bestimmt. Dabei treten folgende Formen der Weg-Zeit-Funktion auf.

- A. Die primäre Bewegung ist langsamer als die Ausgleichsbewegung. Die resultierende Bewegung besteht aus Impulsen. Die Bewegungsimpulse werden auch als Schall im Material weitergeleitet.
- B. Die Dämpfung der Ausgleichsbewegung ist so gering, daß Überschwingungen auftreten. Es entsteht ein höherfrequenter Schallpegel.
- C. Der stick-slip-Vorgang wird durch eine angeregte mechanische Schwingung synchronisiert. Je nach Güte und Frequenz des angeregten Resonatorgebildes können sich Sinus-Schwingungen großer Amplitude anregen, die ein Spektrum hoher Momentangeschwindigkeiten darstellen.

Der Fall A tritt in der Feinmeßtechnik bei der Einstellung kleinster Wege und genauer Positionen durch eine große Einstellunsicherheit und -hysterese in Erscheinung.

Wenn die Gleitgeschwindigkeit (primäre Bewegung) über die Geschwindigkeit der Ausgleichsbewegung steigt, verläuft die Bewegung homogen bis auf die Anfangs- und Endphase derselben. Es läßt sich also für jede Gleitflächenkombination eine Minimalgeschwindigkeit angeben, die noch homogen verläuft. Diese hängt von der Haftreibung, der Gleitreibung und der Geschwindigkeit der Relaxationsvorgänge in den beiden Materialien ab. In dem Kunststoff Polytetrafluoräthylen (Handelsname Teflon oder PTFE) wurde ein Werkstoff gefunden, der viskoelastische Eigenschaften zeigt, d. h., bei kurzzeitigen mechanischen Beanspruchungen ist er sehr hart und bei lang andauernden elastisch. Nach Aufhebung der lang andauernden Belastung nimmt der deformierte Körper langsam nach einer exponentiellen Zeitfunktion seine ursprüngliche Form wieder an. Die Oberflächenreibung von PTFE z. B.

mit Stahl ist gering, so daß in der Feinmeßtechnik mit PTFE belegte Gleitbahnen zum Erreichen hoher Einstellgenauigkeiten benutzt werden.

Im Fall C ist die erzeugte Schwingung oft hörbar. Außerdem ist ein hoher Verschleiß der Gleitflächen festzustellen. Durch Schmiermittel können die Reibungskoeffizienten variiert und die Schwingungen des Resonatorgebildes gedämpft werden. Die minimale homogene Geschwindigkeit (siehe Fall A) verschiebt sich aber durch die höheren Adhäsionskräfte des Schmiermittels nach höheren Werten, d. h., durch Schmiermittel können Oszillationen beseitigt werden, wobei sich jedoch der stick-slip-Effekt erhöht.

Auch wenn die stick-slip-Bewegung eine sehr kleine Amplitude hat, können im Vergleich zu 20 nm/s durch die hohe Frequenz derselben Spektren hoher Momentangeschwindigkeiten entstehen. Wenn man auch in der Technik eine solche hydraulische Anordnung als starr und inkompressibel ansieht, sind Flüssigkeit, Metallzylinder und Kolben Schall gut leitende Materialien, d. h. in bestimmten Frequenzbereichen elastisch und schwingungsfähig. Oszillationen im Inneren der hydraulischen Anordnung durch Wirbelbildung in der Flüssigkeit sind bei dem vorliegenden Verhältnis von Rohrdurchmesser und Durchflußgeschwindigkeit nicht zu erwarten.

Nachteile des mit einem Hydraulic Master gesteuerten hydraulischen Mössbauerspektrometers sind die, daß die Spektren nur punktwise mit konstanter Geschwindigkeit aufgenommen werden können und daß eine Ausregelung von Nichtlinearitäten und parasitären Schwingungen innerhalb einer Bewegungsperiode nicht möglich ist.

2.2.2.14 Hydraulischer Antrieb mit definiertem Druck und Strömungswiderstand

Den Arbeiten [58] [59] liegt der Gedanke zugrunde, daß eine homogene Bewegung mit linearer Geschwindigkeit aus einem Vorgang abgeleitet werden kann, bei dem z. B. in gleichen Zeiten

gleiche Flüssigkeitsmengen aus einem Reservoir fließen oder aus einer stabilisierten Spannungsquelle über einen konstanten Widerstand gleiche Strommengen in gleichen Zeiteinheiten entnommen werden. Bei der hydraulischen Version ist es schwerer als bei der elektronischen, den Druck im Vorratsgefäß stabil und das zwischen Vorratsgefäß und Arbeitszylinder vorhandene Druckgefälle konstant zu halten. Schwierig ist es, 100 bis 1000 fein abgestufte Strömungswiderstände oder Druckdifferenzen herzustellen und eine Oszillation durch Wirbelbildung in der Flüssigkeit in ihnen zu vermeiden. Über das Auftreten des stick-slip-Effektes am bewegten Kolben wird berichtet, daß bei Drücken von ca. $1,4 \text{ kg/cm}^2$ fast keine stick-slip-Effekte mehr zu beobachten waren. Trotzdem wird die überlagerte Störgeschwindigkeit mit $V = 1...4 \cdot 10^{-2} \text{ mm/s}$ angegeben. Es wird weiterhin über Schwierigkeiten der Druckstabilisierung mit Nadelventilen berichtet. Es scheint also günstiger zu sein, die Bewegungsfunktion elektronisch zu erzeugen und einen geeigneten elektrohydraulischen Wandler zu verwenden. Die Erzeugung einer Bewegung konstanter Beschleunigung mit der vorstehend diskutierten Methode scheint möglich zu sein. [61] ... [64]

2.2.2.15 Aufnahme des Mössbauerspektrums durch Variation des Temperaturunterschiedes zwischen Quelle und Absorber

Die Methode der Aufnahme eines Mössbauerspektrums durch eine stufenweise Variation des Temperaturunterschiedes zwischen Quelle und Absorber wurde bereits unter Punkt 2.2.1 behandelt. Ein Spektrum kann mit dieser Methode nur punktweise analog einer Relativbewegung mit konstanter Geschwindigkeit aufgenommen werden.

2.3.1 Formen der Spektrenabtastung in Mössbauerspektrometern

Zur Untersuchung eines Mössbauerspektrums wird allgemein eine maximal notwendige Geschwindigkeit festgelegt. Aus der Anzahl der Meßpunkte, aus denen sich das Spektrum zusammensetzt, ergeben sich die Minimalgeschwindigkeit, die Abstufung der Ge-

geschwindigkeiten und die erforderliche Genauigkeit der einzelnen Geschwindigkeitsstufen. Das gilt für die Methode, wo die einzelnen Geschwindigkeitsstufen nacheinander eingeschaltet und die Impulsraten ermittelt werden. Dabei kann sich über die Zeitdauer der Messung hinweg sowohl die Strahlenquelle (Halbwertszeit) als auch die Strahlennachweisapparatur verändern (Schwankung von Speisespannung und Temperatur). Auch technisch günstiger ist der Betrieb mit linear zeitveränderlicher Geschwindigkeit innerhalb einer Bewegungsperiode. Es entsteht eine ~~parabolische~~ Bewegung*. Die technisch geeignetste Lösung ist die Form, die durch Integration einer Dreiecksspannung eine sinusähnliche Form entstehen läßt. Diese Form kommt der wechselnden Abbremsung und Beschleunigung der Quelle entgegen und enthält sowohl negative als auch positive Relativgeschwindigkeiten. Abb. 3 zeigt noch zwei weitere gebräuchliche Parabelbogenfolgen und die zugehörigen differenzierten Kurven.

Die Parabelformen B und C werden u. U. dann benutzt, wenn die Auslenkung des Bewegungssystems nicht symmetrisch zur Ruhelage erfolgt.

Für Routinemessungen ist es wichtig, einzelne Punkte des Spektrums z. B. als Maßstab für den Ablauf eines chemischen Prozesses einstellen zu können. Bei der bisherigen Betrachtung lag der Meßbereich immer symmetrisch zum Geschwindigkeitsnullpunkt, und die Auflösung war automatisch durch die eingestellte Maximalgeschwindigkeit und die Anzahl der Meßpunkte gegeben. Bei sehr schmalen Linien und einer relativ breiten Aufspaltung des Spektrums ist es erforderlich, dicht um eine festgelegte Geschwindigkeit eine große Anzahl von Meßpunkten zu erhalten. Das entspricht einer Teilbereichsmessung eines Spektrums mit ungewöhnlich hoher Anzahl der Meßpunkte.

2.3.1.1 Genauigkeitsbetrachtungen

Wenn man den Geschwindigkeitsbereich von $2 \cdot 10^{-6}$ bis 10^{-3} cm/s betrachtet und in 500 Meßpunkte unterteilt, ergibt sich eine Kanalbreite von $2 \cdot 10^{-6}$ cm/s. Läßt man als Fehler eine halbe

*konstanter Beschleunigung

Kanalbreite zu, bedeutet das für die niedrigste Geschwindigkeit eine Genauigkeit von 50 % und für die Geschwindigkeit 10^{-3} cm/s eine solche von 0,1 %. Die erforderliche Genauigkeit erhöht sich aber um zwei Zehnerpotenzen, wenn man z. B. um den Wert 1 cm/s 500 Meßpunkte mit einem Kanalabstand von $2 \cdot 10^{-6}$ cm/s anordnen möchte. Zu lösen ist diese Aufgabe dadurch, daß man mit zwei Bewegungssystemen arbeitet, einem für die hohe Grundgeschwindigkeit von 1 cm/s und einem für die Feinbewegung. Dabei können Quelle und Absorber auf je eines der Systeme montiert werden. Fehler des Systems für die Grundgeschwindigkeit können durch die Verknüpfung der Regelkreise durch das Feinbewegungssystem ausgeglichen werden. Es ist dabei nötig, die Bewegungsperioden beider Systeme zu synchronisieren. Diese Form der Spektrenabtastung ist weniger für den Betrieb mit konstanter Beschleunigung geeignet.

2.3.1.2 Äußere Störung der Relativbewegung

Durch Erschütterungen des Aufbaues (Seismik, Gebäudeschwingungen), durch Mikrophonie (Anregung durch Luftschwingungen), durch Schall- und Ultraschallerzeugung und -leitung innerhalb des Gerätes und durch Bewegungen innerhalb der Kristallgitter von Quelle und Absorber wird der erzeugten Relativgeschwindigkeit ein ganzes Geschwindigkeitsspektrum überlagert.

Zur Beseitigung dieser Störungen muß das Bewegungssystem in einem Kellerraum untergebracht sein, wo es nach Möglichkeit auf einem Betonsockel ruht, der auf Felsen gegründet ist. Das über dem Keller befindliche Gebäude sollte keine erschütterungsintensiven Maschinen (Pressen, Stanzmaschinen, u. a. m.) enthalten. Außerdem sollten keine verkehrsreichen Straßen oder Bahnlinien an dem Gebäude vorbeiführen. Die Höhe der zulässigen äußeren Erschütterungen hängt von der Stabilität des Geräteteils ab, der sowohl die Quelle als auch den Absorber trägt. Äußere Erschütterungen können durch eine Lagerung auf einem Feder-Masse-System mit ausreichend niedriger Resonanzfrequenz bzw. hoher Dämpfung (Lagerung auf Schaumpolystyrol, Schaumgummi, Schwammgummi, Viskoseschwamm u. ä.) gedämpft werden. Die Empfindlichkeit

eines Systems auf Mikrophonie (Anregung durch Schallwellen in der Luft) hängt vorwiegend von den Eigenschaften des Bewegungssystems (unter Berücksichtigung der Wirkung des Regelkreises) ab. Elektrodynamische Systeme neigen zu einer hohen Mikrophonieempfindlichkeit, begründet durch die Art der Aufhängung und die innere Stabilität des beweglichen Teiles. Durch eine Abdeckung der Anordnung mit schallschluckenden Medien (Schaumpolystyrol, Filz usw.) kann die Schallbeeinflussung verhindert werden. Durch leichte Regelschwingungen (bzw. HF-Überlagerungen auf dem Regelsignal), dynamische Kräfte durch die Einwirkung von Hochfrequenz (elektrisch oder magnetisch) z. B. eines HF-Wegmeßsystems oder durch innere und äußere Reibung deformierter oder bewegter Materialien können Schall- und Ultraschallschwingungen entstehen, die auf Quelle und Absorber übertragen werden. Die Bewegung innerhalb eines Kristalles wird zum großen Teil durch die thermischen Gitterschwingungen verursacht. Durch die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Schwingungszustandes von emittierenden und absorbierenden Atomen ergibt sich eine Linienverbreiterung. Es lassen sich für bestimmte zulässige Linienverbreiterungen Maximaltemperaturen angeben. Die Summe der Momentangeschwindigkeiten aller Geschwindigkeitskomponenten soll in jedem Moment nicht größer als 10 nm/s sein. Damit läßt sich für eine Reihe von Störfrequenzen die maximal zulässige Amplitude (Schwingungsweite) angeben.

2.3.2 Formen der Verknüpfung von Antriebs- und Nachweiselektronik

Bei der stufenweisen Abtastung des Spektrums ist eine Zuordnung der Impulsrate zu der zugehörigen Relativgeschwindigkeit leicht. Die Tore des Impulszählers und der Quarzuhr werden jeweils im linearen Teil einer Phase der periodischen Bewegung geöffnet. Nach Ablauf der vorgewählten effektiven Meßzeit wird die aufsummierte Impulsrate ausgedruckt, der Zähler gelöscht und der Geschwindigkeitsgeber eine Stufe weitergestellt. Untersuchungen mit konstanter Beschleunigung können nur in Verbindung mit einem

Vielkanalspeicher (oder Vielkanalimpulshöhenanalysator) durchgeführt werden. Die Zuordnung der Impulse des Strahlungsdetektors zu einer bestimmten Momentangeschwindigkeit kann einmal dadurch geschehen, daß man den Impulsen den Geschwindigkeitswert in Form ihrer Spannungshöhe aufmoduliert und den Speicher als Impulshöhenanalysator arbeiten läßt [48], bei jedem Detektorimpuls die Höhe der Treibspannung digital mißt und mit diesem Ergebnis den zugehörigen Speicherkanal festlegt oder daß man mit einer Quarzuhr die Speicherkanäle im Zyklus öffnet und aus den Öffnungsimpulsen für den mittelsten und den letzten Kanal das Treibsignal aufbaut (z. B. über einen bistabilen Multivibrator und zwei nachfolgende Integrationsstufen). Die zuletzt beschriebene Methode ist hierbei die genaueste.

3. Versuch der Ableitung einer Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit oder konstanter Beschleunigung aus einem in der Natur gegebenen Vorgang

Für die Erzeugung und Regelung der Relativgeschwindigkeit zwischen Quelle und Absorber in einem Mössbauerspektrometer wurde ein Vorgang gesucht, der eine geradlinige oder parabolische Zeitfunktion enthält, die möglichst beliebig genau darstellbar ist. Dabei wurde gefunden, daß ein Gefäß, welches durch einen konstanten Zustrom einer Flüssigkeit gefüllt wird, eine geradlinige Abhängigkeit des Füllstandes von der Zeit zeigt. Der konstante Zustrom kann aber nur näherungsweise eingehalten werden, so daß hierbei Fehler entstehen. Als Beispiel für eine ~~parabolische~~ Bewegung* wurde der freie Fall untersucht. Aber auch hier ist eine große Zahl von Fehlerquellen vorhanden. Abgesehen davon, daß der fallende Körper nicht reibungsfrei geführt werden kann, treten Luftreibung, Schallbeeinflussung, seismische und Gebäudeschwingungen u. U. auch elektrische und magnetische Effekte als Störquellen auf.

Genau definierte Exponentialfunktionen, z. B. bei Ausgleichsvorgängen, sind häufiger zu finden. Als besonders günstig erweist sich die Kondensatorauf- und entladefunktion, die über einen hochverstärkenden, hundertprozentig gegengekoppelten

* konstanter Beschleunigung

Operationsverstärker ausreichend weit linearisiert werden kann. Es lassen sich Abweichungen von weniger als 10^{-4} von der geraden Linie erreichen. Es liegt nahe, eine solche Musterfunktion mit der gemessenen Bewegungskurve eines Mössbauersystems zu vergleichen und die gebildete Differenz zur Korrektur des Bewegungssystems zu benutzen.

4. Diskussion der Möglichkeiten zur Erzeugung von Präzisionsfeinbewegungen (Abb. 4)

4.1 Auswertung des Vergleichs der bekannten Anordnungen zur Erzeugung der Relativbewegung zwischen Quelle und Absorber in Mössbauerspektrometern für die Konzeption eines Bewegungssystems extrem kleiner Geschwindigkeiten

Im Kapitel 2.2.2.12 wurde festgestellt, daß im Prinzip eine innere Reibung (z. B. bei der Biegung fester Körper) geringere Bewegungsinhomogenitäten erzeugt als eine äußere Reibung (Gleitreibung, rollende Reibung entsprechen der Lagerungen). Deshalb wurden verschiedene Möglichkeiten von Anordnungen zur Erzeugung einer linearen und homogenen Feinbewegung untersucht oder diskutiert. In der Abb. 4 sind die verschiedenen Möglichkeiten dargestellt. Davon wurden der Motor-Spindel-Antrieb und der magnetische Antrieb bereits unter Punkt 2.2.2.7/2.2.2.9 diskutiert.

Ein elektrischer Antrieb wäre mit einem magnetischen nach Punkt 2.2.2.9 zu vergleichen. Auch im elektrischen Feld wächst die Anziehungskraft quadratisch mit dem Abstand. Der Bewegungsbereich müßte viel kleiner sein als der Abstand der festen von der beweglichen Kondensatorplatte. Die wirksame Kondensatorplattenfläche und die anliegende Spannung müßten relativ groß sein. Die Nachteile einer solchen Anordnung sind größer als die einer entsprechenden magnetischen.

Pneumatische Antriebe und Lagerungen sind zur Erzeugung exakter Bewegungen ungeeignet, weil Gase in starkem Maße kompressibel sind. Diese Elastizität führt zusammen mit der zu bewegenden Masse zu mechanischen Schwingungen. Außerdem ist die thermische

Ausdehnung von Gasen sehr groß, so daß eine hohe Empfindlichkeit der Anordnung für Temperaturschwankungen vorhanden wäre.

Hydraulische Antriebe mit äußerer Reibung wurden unter Punkt 2.2.2.13 diskutiert. Ein federnd aufgehängter Körper, angetrieben durch ein hydraulisches System mit innerer Reibung, wurde als optimale technische Lösung ermittelt und unter Punkt 5 beschrieben. [70] [71]

4.2 Festkörperausdehnung zur Feinbewegungserzeugung

Eine Änderung einer Festkörperausdehnung ist durch verschiedene äußere Einflüsse, d. s. äußere magnetische Felder, äußere elektrische Felder oder Temperaturänderungen zu erreichen.

4.2.1 Die thermische Ausdehnung

Vom Wesen der thermischen Ausdehnung im atomaren Bereich her kann man anhand der Kenntnisse über den Charakter der Anziehungs- und Abstoßkräfte ableiten, daß in Zusammenhang mit der thermischen Bewegung der Atome die thermische Ausdehnung von Festkörpern immer mehr oder weniger nichtlinear sein wird. Es sind Stoffe mit positivem und solche mit negativem Ausdehnungskoeffizienten bekannt. Bei verschiedenen Legierungen wechselt das Vorzeichen der thermischen Ausdehnung einmal oder mehrmals in verschiedenen Temperaturbereichen. In der Meßtechnik wird für temperaturstabile Feinmeßaufbauten u. a. Invarstahl benutzt. Diese Legierung zeigt bei Zimmertemperatur gerade einen Vorzeichenwechsel des Ausdehnungskoeffizienten. In der Umgebung dieses Umkehrpunktes ist die Temperatúrausdehnung sehr gering. Die Homogenität der Ausdehnungsbewegung hängt von der Grobstruktur des Materials ab. Bei der Ausdehnung verschieben sich kleine Struktureinheiten (z. B. Kristallite) gegeneinander. Es kommt zu elastischen Deformationen, schnellen Ausgleichvorgängen und plastischen Deformationen, besonders wenn eine Verbiegung dabei mit verursacht wird. Von außen ist die Verformungsarbeit an der durch die innere Reibung erzeugten Wärme zu erkennen.

Die schnellen Ausgleichvorgänge erzeugen hierbei ein Spektrum mechanischen Rauschens, was sich je nach den Dämpfungseigenschaften des Materials an der Oberfläche mehr oder weniger als eine der angestrebten Bewegung überlagerte statistische Schwingung bemerkbar macht. [72]

4.2.2. Magnetostriktive Bewegungserzeugung

Bei der magnetostriktiven Ausdehnung kommt eine weitere Quelle statistischer Inhomogenitäten hinzu. Das ist die Tatsache, daß die Bezirke gleicher Magnetisierungsrichtung (Weißsche Bezirke), die ohne äußeres Magnetfeld eine statistische Verteilung der Magnetisierungsrichtungen zeigen, so daß der Körper nach außen magnetisch neutral erscheint, einzeln sprungartig nacheinander mit wachsender Feldstärke sich in die Richtung des äußeren Feldes einstellen. Dieser Vorgang ist elektronisch nachweisbar (Barckhauseneffekt).

Bei einer Durchflutung von 20 AWdg zeigen Permaloy eine relative Ausdehnung von $\frac{\Delta l}{l} = + 20 \cdot 10^{-6}$, Nickel

einen solchen von $\frac{\Delta l}{l} = - 20 \cdot 10^{-6}$ und Kobaltferrit

maximal $\frac{\Delta l}{l} = + 200 \cdot 10^{-6}$. Das entspricht einer absoluten

Längenänderung eines 100 mm langen Stabes von 2 μ m bzw. 20 μ m. Die Ausdehnungskennlinie ist nichtlinear. Es sind in der Technik magnetostriktive Stelleinheiten z. B. für die Vorschubeinstellung an Schleifmaschinen bekannt. Wenn man den Betrieb eines Mössbauerbewegungssystems in einem Kryostaten in Erwägung zieht, sind magnetostriktive Antriebe wegen der in den Magnetspulen erzeugten Wärmeenergie (soweit es sich nicht um Temperaturbereiche handelt, wo die Supraleitfähigkeit ausgenutzt werden kann) ungeeignet, obwohl Nickelferrite bei sehr tiefen Temperaturen noch einen ausreichenden Magnetostriktionseffekt zeigen.

4.2.3 Festkörperausdehnung durch elektrische Felder

Durch Anlegen elektrischer Felder können piezoelektrische und

ferroelektrische Materialien in ihren Ausdehnungen verändert werden.

4.2.3.1 Piezoelektrische Materialien

Quarz ist wohl eines der bekanntesten und am meisten angewendeten piezoelektrischen Materialien. Die folgenden Werte wurden [74] S. 185 ff. entnommen. Hier werden die Quarzeigenschaften besonders im Hinblick auf eine Erzeugung frequenzstabiler elektrischer Schwingungen untersucht. Quarzkristalle zeigen ein lineares Verhältnis von Dicken- und Spannungsänderung. Für den reziproken piezoelektrischen Effekt bei Quarz gilt

$$l_x = d_{11} \cdot d_x \cdot E_x \quad (10)$$

Dabei sind:

l_x	Längenänderung in x-Richtung
d_{11}	piezoelektrischer Modul "
d_x	Dicke der Scheibe "
E_x	elektrische Feldstärke "

Eine Quarzscheibe von 3 mm Dicke (und etwa 30 mm \varnothing) würde bei einer angelegten Spannung von 500 V ihre Länge um ca. 1,15 nm ändern. Die Resonanzfrequenz einer solchen Scheibe liegt bei 957 kHz. Es ist eine Temperaturstabilität der Frequenz von $\frac{\Delta f}{f} = -20 \cdot 10^{-6}$ pro $^{\circ}\text{C}$ zu erwarten. Ob bei Bewegungen sehr kleiner Geschwindigkeiten weit unterhalb der Resonanzfrequenz eine mechanische Hysterese mit Ausgleichvorgängen verbunden mit einem Spektrum hoher Momentangeschwindigkeiten auftritt, ist nicht meßbar. Wegen des extrem kleinen Weges ist eine Analogmessung und Regelkorrektur desselben nicht möglich.

Zur Justierung optischer Flächen über Wege von ca. 1 μm , z. B. im Fabry-Perot-Resonator, werden Keramikzylinder, die einen reziproken piezoelektrischen Effekt zeigen, verwendet. [43] [44]

Die Längenänderung eines solchen Zylinders in Abhängigkeit von der angelegten Spannung läßt sich nach der folgenden Gleichung berechnen

$$\Delta l = \left| d_{3/1} \right| \frac{1}{d} : U \quad (11)$$

dabei sind:

Δl	Längenänderung
$d_{3/1}$	piezoelektrischer Modul
l	Zylinderlänge
d	Dicke der Zylinderwand
U	angelegte Spannung

Mit einem in [43] [44] verwendeten Keramikrohr wird eine Längenänderung von 1,2 μm bei einer angelegten Spannung von 1000 V erreicht. Das Geschwindigkeitsspektrum, das bei der Bewegung eines solchen Keramikrohres auftritt, ist theoretisch sehr breit, was aus der Struktur der keramischen Masse abgeleitet werden kann (vgl. innere Reibung Punkt 2.2.2.12). Oft werden die piezoelektrischen Keramikrohre auf ihrer mechanischen Resonanzfrequenz erregt. Dadurch ist eine homogene Sinusschwingung erreichbar. In [40] wird festgestellt, daß das Verhältnis von erreichbarer Schwingungsweite und Periodendauer der Schwingung nahezu konstant ist. Es ergibt sich in jedem Falle eine Maximalgeschwindigkeit von ca. 1000 mm/s. [73] [74]

4.2.3.2 Ferroelektrische Materialien

Ein bekanntes ferroelektrisches Material mit hoher Dielektrizitätskonstante ist Bariumtitanat, was z. B. zur Herstellung von niederohmigen Ultraschallgebern und keramischen Hochfrequenzfiltern für Transistorverstärker verwendet wird. Bei der Elektrostriktion ist die Dickenänderung dem Quadrat der angelegten Spannung proportional, d. h. prinzipiell nichtlinear. Durch Anlegen einer konstanten Vorspannung und dadurch, daß nur ein kleiner Teil des Bewegungsbereiches ausgenutzt wird, ist für viele Zwecke eine ausreichende Linearisierung der Kennlinie

möglich. [74] S. 190 Das Verhalten bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten bezüglich deren Homogenität unterscheidet sich nicht von dem der piezoelektrischen Keramik.

Aus den Ausführungen der vorstehenden Punkte 4.2.1 bis 4.2.3 geht hervor, daß keine der Möglichkeiten der Längenänderung eines Festkörpers, wegen der kleinen Wege und der damit verbundenen Notwendigkeit der genauen analogen Messung derselben zur Korrektur der Bewegung, wegen der vorhandenen Inhomogenitäten der Bewegung bei sehr kleinen Geschwindigkeiten und wegen der z. T. vorhandenen Nichtlinearität der Bewegungskennlinie als Lösung der gestellten Aufgabe in Frage kommt. Die Bedingungen werden durch einen bewegten in einer Richtung federnd aufgehängten Körper erfüllt, wobei die Kräfte der Federn, die u. a. durch deren innere Reibung bei der Biegebeanspruchung entstehen, die Bewegung des Körpers in der vorgesehenen Bewegungsrichtung nicht nachteilig beeinflussen dürfen.

5. Hydraulische Wandler zur Umsetzung einer Volumenausdehnung in eine geradlinige mechanische Bewegung ohne äußere gleitende Reibung (Abb. 5)

5.1.1 Untersuchung einer Bourdonfeder für Temperaturmessungen

Einen hydraulischen Bewegungsgeber, bei dessen Bewegung nur eine innere Reibung des Materials durch Verbiegung zur Wirkung kommt, stellt eine Bourdonfeder dar. Zur Untersuchung der Eigenschaften wurde die Bourdonfeder eines Fernthermometers der Firma Paul Wegener KG Ballenstedt mit einer Strichplatte anstelle des Zeigerräderwerkes versehen und der Meßfühler der Anordnung in das Silikonöl eines Dilatometers getaucht. Die Bourdonfeder bestand aus einem nahtlos gezogenen, ovalen, ca. 330° gebogenen Bronzerohr. Die Meßflüssigkeit war H_2SO_3 . Als Druckübertragungsflüssigkeit wurde Chlorbezol benutzt. Der zugelassene Maximaldruck von ca. 60 atü, d. h. der vorgesehene Arbeitstemperaturbereich von 0 bis 80°C , wurde im Laufe der Messungen nicht überschritten. Unter dem Meßmikroskop war festzustellen, daß

der von der Firma angegebene Toleranzbereich nur bei sehr langsamen Temperaturschwankungen eingehalten wurde. Wenn der Temperaturbereich von 20°C in 115 min durchfahren wurde, zeigte sich eine starke Hysterese. Außerdem war unter dem Meßmikroskop eine sehr starke Inhomogenität der Bewegung festzustellen. Die Geschwindigkeit, die der gleichmäßigen Erwärmung oder Abkühlung des Dilatometers hätte proportional sein müssen, unterlag statistischen Schwankungen. In ⁿachen Zeitintervallen schien die Strichplatte fast stillzustehen, in anderen bewegte sie sich mit schätzungsweise der zehnfachen mittleren Geschwindigkeit. Dieses Bronzerohr ist ein Musterbeispiel für die innere Reibung. Die ausgedehnten Bewegungsschwankungen mit zur direkten optischen Beobachtung ausreichend großen Zeitkonstanten werden auf die Strukturunterschiede des Kristallgefüges in verschiedenen Schichten der Bronze, die durch den Zieh- und Biegeprozeß zustande gekommen sind, zurückgeführt. Für Drücke bis etwa 100 atü werden Bourdonfedern aus Stahl hergestellt. Ein Material mit guter Druckfestigkeit, guten Federeigenschaften und kleiner Hysterese und Einstellzeit ist das sog. Nickel-Span-Rohr C [75] ... [77]

5.1.2 Bourdonfedern mit mehreren Windungen

Hochempfindliche Bourdonfedern mit mehreren spulenförmig, zylindrisch angeordneten Windungen (z. B. 28) aus Quarzglas werden in einem Prospekt der Firma Texas Instruments als Differenzdruckmesser angeboten [78]. Die Auflösung des Meßgerätes beträgt $2 \cdot 10^5$ Teilstriche über einen Drehwinkel von 100° hinweg. Der Nachteil einer solchen Anordnung in bezug auf die Erzeugung geradliniger Bewegungen ist seine Erschütterungsempfindlichkeit - die einzelnen Windungen schwingen leicht gegeneinander - und die Tatsache der kreisförmigen Bewegung der End- bzw. Anzeigefläche. Eine Anordnung der Windungen in einer flächenhaften konzentrischen Spirale bringt ähnliche Eigenschaften.

Wie Abb. 6 zeigt, ist es möglich, einzelne Bögen (Windungen) der Grundform der Bourdonfeder so in einer Reihe aneinander-

zusetzen, daß bei einer geraden Anzahl von Halbkreisbögen die bogenförmigen Bewegungen der einzelnen Halbkreisbögen kompensiert werden. Die Vollständigkeit der Kompensation hängt von der Präzision und Gleichförmigkeit der einzelnen Windungen ab. Die Eigenschaft der leichten Erregung mechanischer Schwingungen des ganzen Gebildes aber bleibt erhalten.

5.2 Druckwandlergefäße mit einer oder zwei elastischen Begrenzungsflächen

5.2.1 Vergleich der Druckwandlergefäßtypen

In der Druckmeßtechnik werden häufig Membranfedern verwendet. Eine Kreissocheibe eines elastischen Stoffes ist am Rand fest eingespannt. Durch den anliegenden Druck wird die Scheibe auf der Seite des niederen Druckes gewölbt. Der Mittelpunkt der Scheibe wird am weitesten aus der Ruhelage ausgelenkt. Dabei wird die Scheibe sowohl auf Biegung als auch auf Streckung elastisch beansprucht. Es werden nur sehr kleine Wege für relativ große Druckschwankungen erreicht. Die Linearität, d. h. die lineare Abhängigkeit der Auslenkung vom anliegenden Druck, ist von den Materialeigenschaften und vom Gegendruck und dessen Angriffsfläche abhängig. Das wird am besten deutlich, wenn man den Mittelpunkt der Membran fixiert. Es ergibt sich ein Kreis größter Auslenkung. Die Auswirkungen der Inhomogenitäten des Materials lassen sich gut an einer Gummimembran demonstrieren. Im Extremfalle ergeben sich Zentren starker Dehnung (Beulen) und eine seitliche Verschiebung des Mittelpunktes. Zum Erreichen eines größeren Federweges werden in die Membranfeder konzentrische Wellen geprägt. Für viele Anwendungen (Barometerdruckkörper, sog. Druckdosen oder Kapselfedern) reicht das Verhältnis der Federkräfte in Bewegungsrichtung^{zu denen} senkrecht dazu aus. Eine solche Membrane wird nur auf Biegung (Abflachung der Wellen) beansprucht. Die Federkräfte sind viel geringer als bei nicht gewellten Membranen (sog. Plattenfedern). Abb. 7

5.2.2 Balgenfederformen für homogene und lineare Feinbewegungen

Den Druckdosen oder Kapselfedern sind Balgenfedern dem prinzipiellen Aufbau und den Eigenschaften nach verwandt. Abb. 7 Für Balgenfedern sind z. T. für speziell angepaßte Formen in verschiedenen Anwendungsgebieten weiterhin folgende Bezeichnungen zu finden: Federbalg, Faltenbalg, Wellrohr, Federungskörper. Für den Zweck der Erzeugung einer geradlinigen Bewegung läßt sich ein Federbalg wie folgt charakterisieren: Der Federbalg besitzt zwei steife Endflächen, die sich durch die Verformung des zwischen ihnen liegenden Balges relativ zueinander bewegen. An einer der beiden Flächen befindet sich häufig die Zuführung der Übertragungsflüssigkeit. Der Querschnitt des Balges bzw. die Endflächen können verschiedene geometrische Formen annehmen, z. B. Kreis, Rechteck, Quadrat, Zweieck usw. Es ist weiterhin möglich, den Balg als Zylinderring auszuführen. Das hat bei der Anwendung in der Mössbauerspektrometrie z. B. den Vorteil, daß bewegte Absorber in Transmission der Strahlung gemessen werden können. Jede Querschnittsebene des Balges kann durch konstruktive Maßnahmen als Bewegungsnullebene in bezug auf die umgebende Apparatur fixiert werden. Entsprechend dem Teilungsverhältnis des Balges erhalten die Endflächen bei konstanter Relativgeschwindigkeit unterschiedliche Absolutgeschwindigkeiten als Teile der Relativgeschwindigkeit. Die Ausdehnung des Balges kommt dadurch zustande, daß bei konstanter Oberfläche durch Verformung derselben eine Volumenänderung erreicht werden kann bzw. durch eine druckabhängige Volumenvergrößerung eine Oberflächenverformung und gleichzeitig eine Streckung des Balges hervorgerufen wird. Aus der elementaren Geometrie ist bekannt, daß die Kugel derjenige Körper ist, bei dem für ein vorgegebenes Volumen die kleinste mögliche Oberfläche vorhanden ist. Saugt man aus einer aufgeblasenen unelastischen Plastefoliekugel die Luft aus, bleibt eine faltige Doppelfolie übrig. Dieses Beispiel soll den Extremfall prinzipiell illustrieren. Es ist weiterhin bekannt, daß in einer flexiblen Kugelhülle, bei der im Inneren ein größerer Druck herrscht als außerhalb der Kugel, die Größe des Druckes an

jeder Stelle der Wand gleich ist und die Richtung des Kugelradius hat. Daraus folgt, daß die Wirkung des Druckes an keiner Stelle der Kugel dahin geht, die prinzipielle Kugelform zu verändern und damit die Wandung auf Biegung zu beanspruchen. Die Wirkung des Druckes besteht in der Dehnung der Kugelhülle (Zugbeanspruchung des Materials) d. h. in der Vergrößerung des Kugelradius.

Für den Querschnitt eines Federbalges leitet sich hieraus ab, daß für eine lineare Abhängigkeit der Ausdehnung (in ausschließlich einer Richtung) vom Druck die Kreisform die günstigste ist. Wenn man erreicht, daß die Ausdehnung des Balges senkrecht zur vorgesehenen Bewegungsrichtung ausreichend klein bleibt, scheint eine solche Anordnung zur Erzeugung einer geradlinigen, linearen und homogenen Bewegung von allen genannten am geeignetsten zu sein.

Folgende Wellenformen für Federbälge sind als naheliegend zu bezeichnen (Schnitt durch eine Ebene, die die Bewegungsrichtung enthält):

1. Rechteckform
2. Symmetrische oder unsymmetrische Dreieckform
3. Parabelbogenform
4. Sinusbogenform
5. Kreisbogenform

Dabei können bei den Punkten 3 bis 5 nur sich nach einer Seite öffnende Bögen aneinander gesetzt sein oder Bögen entgegengesetzter Öffnungsrichtung einander abwechseln.

Alle Bogenformen - bis auf die aneinandergesetzten Halbkreisbögen einer Öffnungsrichtung - zeigen beim Anlegen eines Innendruckes an den Balg das Bestreben, ihre prinzipielle Form zu ändern und sich der Kugelform zu nähern, d. h., die Flanken des Rechteckes und seine Deckfläche wölben sich aus, die Dreieckflächen wölben sich aus, und bei allen Doppelbögen vergrößern sich die Außenbögen, und die Innenbögen verkleinern sich. Diese unkontrollierbare Vergrößerung des Balgvolumens bedeutet eine Verringerung der gewünschten Ausdehnung und eine nichtlineare Abhängigkeit derselben vom Druck, da bei der Wellenverformung

die effektiven Federkräfte durch die Änderung der Biegungsverteilung und der angreifenden Kräfte von dem Grad der Wellenverformung abhängig sind. Es kommt zu einer Verteilung der Ausdehnung in der gewünschten Richtung und in den parasitären nach dem Verhältnis der Federkräfte. Außerdem gibt das Vorhandensein zweier Ausdehnungsrichtungen zusammen mit der Masse der Flüssigkeit, die bewegt werden muß, um eine Kompression in der einen Bewegungsrichtung durch eine Expansion in der anderen Richtung auszugleichen, die Möglichkeit von Schwingungen besonders im Zusammenhang mit einer elektronischen Bewegungsregleinrichtung. Der unerwünschten Querexpansion kann dadurch begegnet werden, daß an den Deformationszentren die Wandstärken vergrößert werden. Dadurch wird der Verformungseffekt nur abgeschwächt. Außerdem entstehen Biegungszentren für die gewünschte Balgausdehnung die wegen der u. U. zu erwartenden Verschiebungseffekte (inhomogene Bewegung durch innere Reibung) im Inneren des Balgmaterials vermieden werden sollten.

Wie schon erwähnt, ist die Wellenform, die durch Aneinanderreihung nach einer Seite geöffneter Halbkreisbögen gebildet wird, die günstigste, wenn beachtet wird, daß die Form der Kreisbögen bei der Balgausdehnung nur unwesentlich verändert wird (Abb. 8) d. h., der Radius des Halbkreisbogens muß sehr viel größer als die maximale Ausdehnung des Balges sein. Wenn man annimmt, daß die Fläche der Halbkreise bei der Ausdehnung nahezu konstant bleibt, hängt die Balgausdehnung linear von der Volumenvergrößerung ab. Diese Annahme gilt um so mehr, je kleiner der Bogenradius im Verhältnis zum Balgdurchmesser ist. Eine weitere Bedingung für die lineare Abhängigkeit der Ausdehnung in der gewünschten Richtung von der Volumenvergrößerung ist die, daß der effektive oder hydraulisch wirksame Durchmesser des Balges über den Ausdehnungsbereich konstant bleibt. Bei Rechteck- und Dreieckswellen setzt sich der effektive Radius aus der halben inneren lichten Weite des Balges und der halben Wellenhöhe zusammen. Bei der Halbkreisbogenform muß die halbe Wellenhöhe durch das Produkt

$$r' = \frac{\pi \cdot r}{4} \quad (12).$$

ersetzt werden. Der effektive Durchmesser ist dadurch gekennzeichnet, daß die mit zum Flüssigkeitsvolumen gehörenden Flächenteile, die in der Schnittzeichnung über diesem liegen, ebenso groß sind wie die, die nicht zum Flüssigkeitsvolumen gehören und unter diesem liegen. (Abb. 10)

Wenn die steifen seitlichen Grenzflächen den Balg bei dem effektiven Durchmesser halten, nähern sich bei der Ausdehnung desselben die extremen Punkte der Wellen dem effektiven Durchmesser, d. h. dieser bleibt konstant. Wird der Balg dagegen an den inneren oder äußeren Extrempunkten der Wellen gehalten, ergibt sich eine Verkleinerung oder Vergrößerung des effektiven Durchmessers. Alle kreisförmigen Querschnitte des Balges, die nicht den effektiven Durchmesser des Balges besitzen, erleiden bei der Balgausdehnung eine Veränderung zum effektiven Durchmesser hin. Dabei ist eine Dehnung der kleinen Durchmesser wahrscheinlicher als eine Stauchung der Ringe mit großen Radien, so daß auch hier gefordert werden muß, daß die Radien sehr groß gegen die vorgesehene Balgausdehnung sind. Nur bei kleinen Bewegungen wird dieselbe ausschließlich von der Deformation der steilen Wellenteile getragen (Abb. 10). [79] ... [82]

5.2.3 Materialauswahl für Balgenfedern zur Erzeugung von Bewegungen mit schmalem Momentangeschwindigkeitspektrum

Für die Auswahl des Materials für die Federbälge stehen Stahl, Bronze und Kunststoffe zur Verfügung. In der Steuer-, Meß- und Regelungstechnik werden meist Federbälge aus Stahl und Bronze benutzt, wobei die Balgwände für höhere Drücke auch aus mehreren Blechschichten bestehen können. Die Bälge werden durch Explosionsverformen von nahtlosen Rohren hergestellt. Ein ähnliches Verfahren wird auch für die Herstellung von Bälgen aus Polyäthylen verwendet. Im Laufe der Arbeit wurden eine Reihe von serienmäßig hergestellten Bälgen im VEB Carl Zeiss und in einer Belegarbeit am Institut für allgemeine und optische Meßtechnik untersucht (Großer Beleg von cand. ing. R. Nötzel 4C-89/67 im Rahmen des

Forschungskoooperationsvertrages Vf 8-65 8/7 zwischen dem VEB Carl Zeiss Jena und der TH Ilmenau). Die Bälge zeigten an einem thermohydraulischen Druckerzeuger, der es gestattete, Ausdehnungen mit einer Geschwindigkeit von einigen Mikrometern pro Sekunde zu erzeugen, keine visuell sichtbaren Inhomogenitäten der Bewegung. Die Untersuchung der Bewegung auf deren Homogenität und auf Taumelbewegungen der Vorderflächen der Bälge wurden am großen Michelson-Interferometer mit einer Maximalauflösung von $\pm 0,272 \text{ } \mu\text{m}$ Weg pro 15 s durchgeführt. Auch eine Messung der zeitlichen Abstände der Interferenzlinien konnte aus dem Toleranzspektrum keine Inhomogenität feststellen, die auf eine periodische Energiespeicherung schließen ließe. Für diese Versuche wurde eine vom Verfasser konstruierte Interferenzlinienzähleinrichtung zur Linienauszählung in vorgegebenen Zeitintervallen zur Verfügung gestellt (Anlage I). Eine höhere Auflösung wäre unter Verwendung eines Vielkanalanalysators und einer Quarzuhr zu erreichen gewesen. Leider standen diese Geräte nicht zur Verfügung.

Die Verkippungsmessungen im oben genannten Großen Beleg zeigten, daß die Kunststoffbälge, am meisten solche mit einer sichtbaren Naht, die größten Taumelbewegungen ausführten. Auf einer Drehmaschine hergestellte Bälge besitzen die besten Eigenschaften. Als Material für den Federbalg des thermohydraulischen Bewegungsgebers wurde Polytetrafluoräthylen ausgewählt. Dieses Material zeigt bei einem bestimmten Verhältnis von kristalliner zu amorph vorliegender Substanz eine annähernd gleiche Haftreibung und Gleitreibung. Das wurde für die äußere Reibung unter einem bestimmten Auflagedruck bewiesen. Wenn man für die innere Reibung ähnliche Verhältnisse annimmt, ist für einen stick-slip-Effekt keine Voraussetzung vorhanden. Weiterhin zeigt PTFE viskoelastisches Verhalten, d. h., es erscheint für kurzzeitige Belastungen sehr hart, und für lang andauernde Belastungen weichelastisch. Nach Aufhebung der Belastung erfolgt eine anfangs schnellere und später langsam verlaufende Rückbewegung bis zur permanenten Restverformung, dem Kaltfluß. Diese Bewegung läßt sich durch eine Summe von Teilrelaxationen mit unterschiedlichen

Zeitkonstanten darstellen. Die Eigenschaft der Viskoelastizität ist für die Unterdrückung von überlagerten Bewegungskomponenten mit hohen Momentangeschwindigkeiten sehr von Vorteil. Wegen der guten Eigenschaften in bezug auf die Verkippung wurden die verwendeten Federbälge auf Drehmaschinen hergestellt. Diese Art der Herstellung ist auch die billigste zur Anfertigung von nur wenigen Exemplaren. Nachteilig an PTFE ist die Tatsache, daß es in dünnen Scheiben auch in Richtung der Scheibenoberfläche sehr weich ist - es eignet sich also nicht für Spider (schlechte Zentriereigenschaften) - und daß es sich nicht ohne schwierige Vorbereitungen kleben läßt (Vorbehandlung der Oberfläche mit Natrium in flüssigem Ammoniak und anschließend in Wasser für ein Kleben mit Epoxydharz), so daß die Endflächen des Balges mit Schrauben angepreßt werden mußten. [83] ... [87]

5.2.4 Die Herstellung von PTFE-Federbälgen

Die Bearbeitung der PTFE-Federbälge auf einer Drehmaschine wird mit Drehmeißeln durchgeführt, die entsprechend der gewünschten Wellenform geschliffen sind. Zuerst wird die Außenseite des Balges geformt. Danach wird die Außenseite des zukünftigen Balges mit einer zweiteiligen verschraubbaren Plexiglasform fixiert, worauf die Bearbeitung der Innenseite durchgeführt werden kann, ohne daß der Balg dem Druck des Drehmeißels elastisch ausweichen kann. Zuletzt wird der Balg vom PTFE-Block abgestochen. PTFE kommt in walzenförmigen Blöcken verschiedenen Durchmessers in den Handel. Es muß bei der Bearbeitung darauf geachtet werden, daß die Mittelachse der PTFE-Walze auch die Mittelachse des späteren Balges wird, damit die Materialeigenschaften über den Umfang des Balges gleich sind.

6. Entwicklung einer geeigneten Methode der verzögerungsfreien Flüssigkeitserwärmung (Abb. 9)

6.1 Möglichkeiten der Flüssigkeitserwärmung

Für die hydraulische Steuerung des Federbalges besteht prinzipiell auch die Möglichkeit der hydraulischen Untersetzung einer

z. B. elektrodynamisch erzeugten Bewegung. Hierbei addieren sich die Fehler des elektrodynamischen Bewegungssystems zu denen der hydraulischen Anordnung. Jedes System würde eine eigene Rückführung (Regelkreis) zum Generator benötigen. Die Bewegungsperiodendauer müßte mit Rücksicht auf die elastischen Eigenschaften der Bälge, die zu bewegendenden Flüssigkeitsmengen und nicht zuletzt wegen der analogmeßtechnisch notwendigen Mindestweglänge herabgesetzt werden. Dadurch werden die Eigenschaften des elektrodynamischen Bewegungssystems wesentlich verschlechtert, weil die Signalspannung des Geschwindigkeitsgebers über die zulässige Grenze absinkt. Experimentell wurde festgestellt, daß der mit dem elektrischen System gekoppelte Federbalg durch den Widerstand des zweiten Balges zu starken Querexpansionen und Schwingungen angeregt wurde.

6.1.1. Erwärmung durch einen Heizkörper

Unter Berücksichtigung des über die bekannten hydraulischen Systeme Gesagten (2.2.2.13) bleibt die Möglichkeit der Flüssigkeitserwärmung als letzte offen.

Die einfachste Lösung ist das Eintauchen eines Heizelementes in die zu erwärmende Flüssigkeit. Die Eigenschaften eines solchen Systems lassen sich anhand der Beispiele Flüssigkeitsthermostat und Dilatometer sehr gut angeben. Wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit der Flüssigkeiten werden diese zur besseren Durchmischung stark bewegt. Zur Stabilisierung werden Zweipunktregler benutzt, um die Eigenschaft der Systeme, daß das Heizelement auch nach dem Abschalten noch eine gespeicherte Wärmemenge abgibt zu kompensieren. Die Einstellzeitkonstanten sind sehr groß. Eine Proportionalregelung mit großem Frequenzbereich ist unmöglich.

6.1.2 Erwärmung durch Licht- und IR-Absorption

Theoretisch besteht auch die Möglichkeit, die Flüssigkeit durch Einstrahlung von Licht im optischen und im Infrarotbereich zu

erwärmen. Dazu müßte die Flüssigkeit u. U. durch Beimengungen (Lösung oder Gemische) in bezug auf Lichtabsorptionseigenschaften optimiert werden. Die beiden Forderungen der möglichst vollständigen Absorption der eingestrahnten Energie und der gleichmäßigen Wärmeverteilung lassen sich nicht gleichzeitig verwirklichen. Dabei muß diskutiert werden, welchen Einfluß der Wärmeausgleich innerhalb des gleichen Mediums auf die effektive Volumenausdehnung der ganzen Flüssigkeit hat. Wenn der Ausdehnungskoeffizient der Flüssigkeit unabhängig von der Temperatur ist, hat der innere Wärmeausgleich keinen Einfluß auf die Größe des Volumens. Die Kurven des Ausdehnungskoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperatur sind leicht gekrümmt und können nur in einem kleinen Temperaturbereich als linear angesehen werden. Diese Krümmung dürfte sich erst bei hohen Regelverstärkungen bemerkbar machen. Auch bei sehr guter Lichtausnutzung ist der Wirkungsgrad der optischen Heizmethode schlecht. Einfache Glühlampen sind auf Grund ihrer Trägheit regelungstechnisch ungeeignet und steuerbare Gasentladungslampen im Leistungsbereich 50...100 Watt oder gar Laser zu aufwendig.

6.1.3 Erwärmung durch elektrische und magnetische Wechselfelder

Eine ähnliche Lösung stellt die Heizung durch die Einwirkung elektrischer oder magnetischer Wechselfelder dar. Es muß zwischen metallisch leitenden Flüssigkeiten (z. B. Quecksilber) und nichtmetallischen, evtl. ionenleitenden Flüssigkeiten unterschieden werden. Zur Abschätzung der Eigenschaften können die Anwendungen auf anderen Gebieten der Wissenschaft und Technik dienen. Ferromagnetische Materialien können in magnetischen Wechselfeldern (Ausnutzung von Wirbelströmen) erwärmt und geschmolzen werden. Dieses Prinzip wird in Gießereien und in Laboratorien angewendet. Wegen der hohen Schmelzpunkte der in Frage kommenden Substanzen scheidet diese Möglichkeit für den Antrieb von Federbälgen aus.

Ein Fachgebiet, das über die HF-Eigenschaften einer Vielzahl von Stoffen Auskunft geben kann, ist die HF-Titration. Es gibt sowohl Anordnungen mit kapazitiven als auch mit induktiven Meßfühlern. In beiden Fällen wird die Dämpfung eines Schwingkreises durch Wirbel- oder Verschiebungsströme gemessen. Die Messung gestattet Rückschlüsse auf die Leitfähigkeit der Flüssigkeit und den PH-Wert derselben. Man ist bestrebt, bei der HF-Titration die Wärmewirkung zu vermeiden, da sich bei einer schon geringen Erwärmung der Meßflüssigkeit die Leitfähigkeit derselben meßbar erhöht und einen falschen PH-Wert vortäuscht. Es konnte keine Flüssigkeit gefunden werden, die im benutzten Kurzwellenbereich eine höhere Energieabsorption zeigte als etwa ein Prozent der aufgewendeten Scheinleistung. Ein solcher Wirkungsgrad ist unökonomisch. Es gibt Kunststoffe, die sich im HF-Feld bis zum Schmelzen erwärmen. Auch sind Ferrite bekannt, die eine starke Energieabsorption aus HF-Feldern bei bestimmten Frequenzen (Lamorfrequenzen) zeigen. Flüssigkeiten mit ähnlichen Eigenschaften konnten nicht gefunden werden. Genaue Untersuchungen über die HF-Absorption von Flüssigkeiten wurden auf dem Gebiet der HF-Therapiegeräte (Diathermie, Kurzwellenbestrahlung, UHF-Bestrahlung), des Unfallschutzes im Nahfeld von Radarantennen, der HF-Ausbreitung unter Wasser und auf dem Gebiet der HF-Küchengeräte gemacht.

[88] ... [93] Die allgemeine Formel der im elektrischen Feld an die Flüssigkeit abgegebenen Leistung lautet:

$$P_{abs} = 0,556 \cdot 10^{-12} \cdot \epsilon_r'' \cdot E^2 \cdot f \quad (13)$$

Dabei sind:

E die Feldstärke ($\frac{V}{cm}$)

f die Frequenz (Hz)

ϵ_r'' ist die relative Dielektrizitätskonstante der Flüssigkeit im betrachteten Frequenzbereich, multipliziert mit dem Verlustwinkel $\tan \delta$

Aus der Gleichung ist leicht zu ersehen, daß die Frequenz über 100 MHz steigen muß, um den Wirkungsgrad auf einen diskutablen Wert ansteigen zu lassen. Für eine technische Lösung müßte mit einem 100 Watt-HF-Generator im Gigahertzbereich gerechnet werden. Ein solches Gerät stellt einen nicht unerheblichen Aufwand dar.

Die Gleichung für die im elektromagnetischen Wechselfeld absorbierte Leistung lautet

$$\Delta P = P_0 (1 - \exp 2\alpha_d x_s) \quad (14)$$

Darin sind:

ΔP die absorbierte Leistung

P_0 die eingestrahlte Leistung

α_d Dämpfungskonstante

x_s die betrachtete Strecke in Ausbreitungsrichtung

$$\alpha_d = \omega \sqrt{\frac{\mu_r' \cdot \epsilon_r'}{2}} \sqrt{\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_r'^2}\right) - 1} \quad (15)$$

$$\omega = 2\pi f$$

μ_r' relative Permeabilität im betrachteten Frequenzbereich

ϵ_r' relative Dielektrizitätskonstante im betr. Frequenzbereich

σ Leitfähigkeit der Flüssigkeit

$$\alpha = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r'' \left[\frac{S}{m} \right] \quad (16)$$

ϵ_0 absolute Dielektrizitätskonstante

6.1.4 Erwärmung durch unmittelbaren Durchfluß von elektrischem Strom durch die Flüssigkeit

Einen wesentlich geringeren apparativen Aufwand erfordert die Erwärmung der Flüssigkeit durch Stromleitung. Dafür kommt eine solche in elektronenleitenden Flüssigkeiten, ionenleitenden

Flüssigkeiten mit wäßriger Lösung und ionenleitenden Flüssigkeiten mit nicht wäßrigen Lösungen in Frage. Die einzige diskutabile elektronenleitende Flüssigkeit ist Quecksilber. Die hohe Leitfähigkeit von Quecksilber erschwert eine Widerstandsanpassung an den Regelverstärker. Der geringe Ausdehnungskoeffizient erfordert im Vergleich zu Äthylalkohol eine etwa 10 mal größere Wärmemenge und eine ebensovielmal höhere Maximaltemperatur. Das hohe spezifische Gewicht verursacht unerwünschte Balgdeformationen.

Auch wäßrige Lösungen haben einen geringen Ausdehnungskoeffizienten. Andererseits entsteht durch die meist mit vorhandene Wasserelektrolyse Wasserstoff und Sauerstoff in gasförmiger Form an den Elektroden. Die starke Volumenvergrößerung bei der Entstehung der Gasblasen und die starke Kompressibilität des Gases führen zur Instabilität des Regelkreises und u. U. zur Zerstörung der Anordnung. Deshalb wurde eine nicht wäßrige Lösung gewählt.

6.2 Auswahl der Ausdehnungsflüssigkeit für die elektrolytische Zelle

Äthylalkohol erwies sich als besonders geeignet. Er hat einen hohen Ausdehnungskoeffizienten (Volumenausdehnungskoeffizient $\frac{\Delta V}{V} = 1,1 \cdot 10^{-3}$ pro $^{\circ}\text{C}$) und eine verhältnismäßig geringe Wärmekapazität (spez. Wärme $C_L = 0,57 \text{ cal/cm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$).

Methylalkohol hat gegenüber Äthylalkohol eine bessere Ionenbeweglichkeit, einen höheren Ausdehnungskoeffizienten, eine höhere Wärmeleitfähigkeit, aber ein schlechteres Lösungsvermögen für NiCl_2 . Wegen der Bildung von gasförmigen Elektrolyseprodukten und wegen ihrer Aggressivität gegenüber dem Elektrodenmaterial kommen Säuren und Basen nicht in erster Linie als Elektrolyt in Frage. Außerdem wurden auch Versuche mit zwei Silikonölsorten und einer Silikonölemulsion gemacht, die den gleichen hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten wie Alkohol haben. Das Silikonöl NM 1-50 TGL 8467 vom VEB Chemiewerk Nünchritz wird in einem elektrolytischen Bad zersetzt, ebenso

die Silikonölemulsion NE 5 TGL 8468 der gleichen Firma. Die Elektrolyse im wasserlöslichen Silikonöl OE 4302 W vom Institut für Silikon- und Fluorkarbonchemie ist durchführbar. Die außerordentlich schlechte Wärmeleitung der Flüssigkeit führt zu einer lokalen Gasblasenbildung zuerst in Bereichen höherer Stromdichte, die als Trübung zu erkennen ist. Dabei heizt sich die ganze Flüssigkeit nur unwesentlich auf. Die Blasen steigen in der zähen Flüssigkeit nicht schnell auf. Sie kondensieren im Verlaufe einiger Stunden wieder. Dieses Experiment zeigt, daß Silikonöl nicht für eine Erwärmung durch Stromleitung geeignet ist.

In der Literatur werden in elektrolytischen Systemen - nicht zuletzt wegen der hohen Ionenbeweglichkeit - Verbindungen der Elemente Lithium, Natrium und Kalium mit einem der Elemente Chlor, Brom oder Jod, die Alkalihalogenide, verwendet. Über die Ioneneigenschaften dieser Elemente sind auch die meisten tabellarischen Angaben zu finden. [94] ... [96]

6.3.1 Aufbau der elektrolytischen Zelle

Folgende Forderungen sollte die elektrolytische Zelle erfüllen:

1. Das Elektrodenmaterial oder das gelöste Salz dürfen mit dem Lösungsmittel keine Verbindungen eingehen, weil sie sich sonst aufzehren.
2. Es dürfen keine unlöslichen Produkte an den Elektroden entstehen, weil dadurch Substanz irreversibel verändert wird. Dadurch würden dem Bad Ionen entzogen werden, und der Widerstand erhöhte sich. Außerdem ist an den Elektroden dann eine chemische Polarisation feststellbar, die den Widerstand ebenfalls zeitabhängig erhöht.
3. Lösliche Elektrodenprodukte müssen sich in ausreichender Geschwindigkeit in die Ausgangsverbindungen umwandeln.
4. Die Elektroden sollten nicht aus einem schwer angreifbaren Material bestehen, da zwischen dem abgeschiedenen

Metall und dem Elektrodenmaterial eine Polarisationsspannung vorhanden ist. Die Elektroden sollten also aus dem abzuscheidenden Metall bestehen.

5. Beide Elektroden sollten aus dem gleichen Material bestehen, weil sich durch den Unterschied zwischen dem elektrolytischen Lösungsdruck und dem osmotischen Druck des Metalls eine Spannung zwischen einer Elektrode und der Lösung ausbildet. Diese Spannung kann nach außen hin kompensiert werden, wenn Elektroden gleichen Materials verwendet werden.
6. Die Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen sollte unter Berücksichtigung der Solvatation möglichst gleich und möglichst groß sein, weil sich sonst eine Polarisation im Bad mit Raumladungsscharakter bzw. eine Abhängigkeit des Badwiderstandes von der Stromstärke bereits bei Stromstärken ergeben, die noch im vorgesehenen Arbeitsbereich liegen.

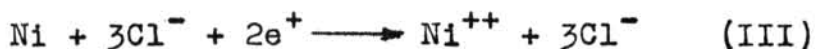
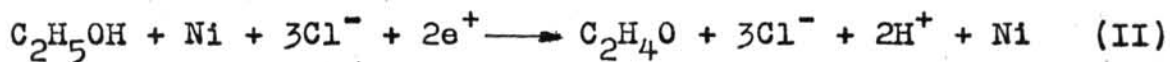
Entsprechend dem Punkt 4 und der Tatsache der sekundären Silberchloridbildung wurde das zeitweilig benutzte System der Zelle mit Silberelektroden und einer Lösung von Lithiumchlorid in Äthylalkohol, was in einer Praktikantenarbeit untersucht wurde [107], verworfen.

Mit Erfolg wurde eine Zelle mit Nickelelektroden und einer Lösung von Nickelchlorid in Äthylalkohol erprobt. Zur Aktivierung der Nickelelektroden wurde eine geringe Menge Salzsäure zugegeben. An der Katode dieser Zelle ist folgende Reaktion möglich:

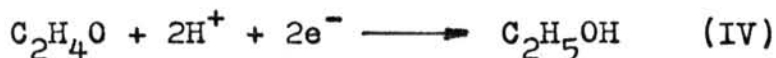


Eine Alkoholatbildung ist auf Grund des vorhandenen Abscheidungspotentials nicht zu erwarten. Es wurde auch keine Trübung der Lösung festgestellt.

An der Anode sind folgende Reaktionen wahrscheinlich:



Gleichgewicht und Anteil der Teilreaktionen werden von der Wasserkonzentration (es wurde nahezu wasserfreier Alkohol verwendet), vom Elektrodenpotential und von den vom PH-Wert abhängigen Abscheidungspotentialen beeinflusst. Dabei ist die Acetaldehydbildung nach der Formel (II) sehr gering. Das Acetaldehyd kann an der Katode wieder in Alkohol umgewandelt werden.



Durch die erhöhte Chlorionenkonzentration, die infolge der Anwesenheit der Salzsäure (ph-Wert-Änderung und NiCl_4 -Komplexbildung) gegeben ist, scheidet sich an der Anode nicht, wie zu erwarten wäre, Chlorgas ab, sondern Nickel geht in Lösung. [95]

Es wird also immer an der einen Elektrode Nickel abgeschieden und an der anderen die gleiche Menge Nickel gelöst. Wenn der Heizstrom in bestimmten Zeitabständen seine Richtung ändert, arbeitet das System über lange Zeit stabil.

Eine stromabhängige Widerstandsänderung durch unterschiedliche Ionenwanderungsgeschwindigkeiten konnte im betrachteten Strom- und Zeitbereich nicht festgestellt werden. [98] ... [107]

6.3.2 Grundlegender Versuch zur NiCl_2 -Zelle

Das Ausdehnungsgefäß wurde mit den mit Sandpapier gereinigten Nickelblechelektroden versehen und mit absolutem Alkohol (handelsüblicher reiner Äthylalkohol vom Lager) gefüllt und der Übergangswiderstand zwischen den Elektroden gemessen. Durch mehrmaliges Durchspülen der Zelle mit Alkohol wurde die Zelle weitgehendst gereinigt und der Zellenwiderstand stieg an. In einem zweiten Gefäß wurde eine konzentrierte alkoholische

NiCl₂-Lösung mit durch Erhitzen wasserfrei gemachten Nickelchlorid hergestellt. Diese Lösung wurde nun tropfenweise in die Zelle gegeben bis der Zellenwiderstand von ca. 500 kOhm auf etwa 1 kOhm abgefallen war. Beim Stromdurchgang durch diese Lösung bilden sich auf einer Elektrode lange Nickelnadeln, und die Lösung färbt sich durch das entstehende und sich lösende Chlorgas grün. Die Nickelnadeln reichen zum Schluß von einer Elektrode zur anderen und schließen das System kurz. Durch Zugabe eines Tropfens Salzsäure wird die Lösung wieder entfärbt (ohne Stromdurchgang) und ein Teil der auf dem Boden liegenden abgefallenen Nickelnadeln unter Wasserstoffbildung aufgelöst. Nachdem das Wasserstoffgas aus der Zelle entfernt wurde arbeitete diese einwandfrei.

7. Der elektronisch gesteuerte thermohydraulische Wandler

7.1 Dimensionierung der Kombination von Heizzelle und Federbalg

Wenn man von der gewünschten Bewegungsweite der Vorderfläche des Federbalges ausgeht, wird durch den effektiven Querschnitt des Federbalges die notwendige Volumenänderung bestimmt. Diese Volumenänderung muß durch die Aufheizung der Flüssigkeitsmenge im Heizgefäß erreicht werden. Prinzipiell steht dafür der Temperaturbereich vom Schmelzpunkt bis zum Siedepunkt ($-114^{\circ} \dots 78,5^{\circ}\text{C}$) zur Verfügung. Bei der Annahme einer maximalen Laborraumtemperatur von 25°C und einer Luftkühlung schränkt sich der Arbeitsbereich mit einem ausreichenden Abstand zum Siedepunkt auf $30^{\circ} \dots 50^{\circ}\text{C}$ ein. Zur Abschätzung der Temperaturverteilung im Heizgefäß und der für die Volumenausdehnung effektiv wirksamen Temperatur soll folgendes Modell dienen: Das Heizgefäß ist flach. Boden und Deckel desselben werden von runden oder nahezu quadratischen Elektroden gebildet, deren Abstand voneinander viel kleiner ist als ihr Durchmesser. Die Elektroden stellen gleichzeitig die Kühlflächen des Heizgefäßes dar. Zur verstärkten Wärmeableitung werden u. U. Kupferrippenkühler an die Elektrodenflächen angelegt. Der schmale Rand des Heizgefäßes, der aus Glas oder Kunststoff besteht,

trägt nur unwesentlich zur Kühlung der Flüssigkeit bei. Für eine grundlegende Betrachtung sei der thermische Widerstand der Flüssigkeit viel größer als der des Elektrodenmaterials und des thermischen Übergangswiderstandes zur Luft, so daß die Elektroden die Zimmertemperatur annähernd beibehalten. Durch den elektrischen Strom wird bei homogener Stromverteilung jedes Volumenelement in jeder bestimmten Zeiteinheit mit der gleichen Energiemenge aufgeheizt. Es stellt sich beim Heizvorgang ein Gleichgewicht zwischen der Aufheizung infolge Energiezuführung mit dem elektrischen Strom und durch die Wärmeableitung über den thermischen Widerstand der Heiz- und Ausdehnungsflüssigkeit ein. Den prinzipiellen Unterschied in der Form der Wärmeerzeugung und Wärmeableitung bedingt eine charakteristische Temperaturverteilung über eine Hälfte des Heizgefäßes. Dadurch, daß beide Elektroden kühlen, ist die Ebene, die von beiden Elektroden gleich weit entfernt ist, die Ebene der höchsten Temperatur. Der Temperaturgradient nimmt in Richtung der Elektroden durch die Zunahme der abzuleitenden Wärmemenge zu. Durch die Ebenen unmittelbar vor jeder Elektrode fließt im thermischen Gleichgewicht die gesamte im Heizgefäß pro Zeiteinheit erzeugte Wärmemenge P . Da es sich bei dem vorliegenden Modell um eine spiegelsymmetrische Anordnung handelt, sei nur eine Gefäßhälfte zwischen der Ebene der höchsten Temperatur und einer Elektrode betrachtet. Der Temperaturgradient einer bestimmten Ebene mit dem Abstand x von der Ebene der höchsten Temperatur ist

$$\frac{dT}{dx} = \frac{P \cdot x}{h_G \cdot A \cdot \lambda} \quad (17)$$

wobei h_G die halbe Gefäßhöhe (in x -Richtung)

A die Fläche der Querschnittsebene

λ die spezifische Leitfähigkeit der Flüssigkeit

sind.

Durch die Integration der Gleichung erhält man die Temperaturverteilungsfunktion im Heizgefäß

$$T_{\max} - T = \frac{P \cdot x^2}{2 \cdot h_G \cdot A \cdot \lambda} \quad ; \quad T = T_{\max} - \frac{P \cdot x^2}{2 \cdot h_G \cdot A \cdot \lambda} \quad (18)$$

Für die effektive Ausdehnung des Flüssigkeitsvolumens ist die mittlere Temperatur maßgebend. Die Wärmemenge, die in der Flüssigkeitsmenge gespeichert ist, die eine höhere Temperatur als die mittlere besitzt, soll gleich der sein, die der Flüssigkeitsmenge fehlt, die eine niedrigere Temperatur als die mittlere hat. Nach dieser Voraussetzung läßt sich der Mittelwert durch eine einfache geometrische Betrachtung aus der obigen Kurve ermitteln. Er liegt bei

$$x = \frac{1}{3} \cdot 3^{\frac{1}{2}} \cdot h_G \quad (19)$$

oder

$$T_{eff} = T_{max} - \frac{1}{3} \frac{P \cdot h_G}{2 \cdot A \cdot \lambda} \quad (20)$$

Geht man von der Bezugstemperatur (Elektrodentemperatur) aus, ergibt sich:

$$T_{eff} = T_z + \frac{2}{3} \frac{P \cdot h_G}{2 \cdot A \cdot \lambda} \quad (21)$$

und

$$T_{max} = T_z + \frac{P \cdot h_G}{2 \cdot A \cdot \lambda} \quad (22)$$

Das bedeutet, daß bei einer Schwankung der Effektivtemperatur zwischen 30 und 50 °C die Spitzentemperatur den Bereich zwischen 31,7 und 56,6 °C bestreicht. Durch eine zusätzliche Kühlung der Elektroden auf tiefere Temperaturen als die Zimmertemperatur T_z , z. B. mit Peltierelementen, kann mehr als der doppelte Temperaturbereich genutzt werden. Das notwendige Volumen des Heizgefäßes berechnet sich dann wie folgt:

$$V = \frac{\Delta V}{\alpha \cdot \Delta T} \quad (23)$$

ΔV ist die notwendige Volumenänderung

ΔT ist die Schwankung der Effektivtemperatur

$\alpha \frac{1}{^\circ\text{C}}$ ist der Volumenausdehnungskoeffizient der geheizten Flüssigkeit

Für einen vorgegebenen Arbeitsbereich wird der notwendige Arbeitstemperaturbereich so groß wie möglich gewählt, um den Einfluß von Zimmertemperaturschwankungen klein zu halten. Der Volumenausdehnungsbereich wird im Arbeitstemperaturbereich als ausreichend konstant angenommen.

Das Verhältnis der maximalen Auslenkung zum zugehörigen Temperaturintervall ist

$$\frac{\Delta s}{\Delta T} = \frac{V \cdot \alpha}{A_B} \quad (24)$$

Δs maximale Auslenkung

A_B effektive Balgfläche

Es charakterisiert die hydraulische Übersetzung zwischen dem Heizgefäß und dem Ausdehnungsgefäß (Federbalg).

Die Gleichungen 17 und 22 gelten nur, wenn die elektrische Leitfähigkeit des Elektrolyten als unabhängig von der Temperatur angenommen wird. Tatsächlich steigt die Leitfähigkeit aber bei einer Temperaturänderung von 0 auf 50 °C etwa um das Doppelte. Das bedeutet, daß kältere Zonen des Elektrolyten einen größeren Widerstand besitzen und dadurch auch stärker aufgeheizt werden, so daß eine Verminderung des errechneten Temperaturunterschiedes vorhanden ist. Dieser Effekt ist nur für die Wärmeableitung von Bedeutung. Der effektive innere thermische Widerstand des Heizgefäßes wird geringer. Durch die Verringerung des maximalen Temperaturunterschiedes liegen die tatsächlichen Grenzwerte innerhalb der berechneten. Der Effekt hat also keinen wesentlichen Einfluß auf die durchgeführte Dimensionierung der Heizzelle.

Unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit der alkoholischen NiCl_2 -Lösung ergibt sich aus der Gleichung 17

$$\frac{dT_x}{dx} = \frac{U^2 \cdot G \cdot x}{h_G \cdot A \cdot \lambda} \quad (25)$$

$$\frac{dT_x}{dx} = \frac{U^2 \cdot G \cdot (1 + k_T \cdot T) \cdot x}{h_G \cdot A \cdot \lambda} \quad (26)$$

$$T_x = \frac{1}{\frac{2 \cdot A \cdot h_G \cdot \lambda}{x^2 \cdot U^2 \cdot G} - k_T} \quad (27)$$

Hierbei sind G die elektrische Leitfähigkeit der Lösung und k_T die Änderung der Leitfähigkeit pro Grad.

In der bisherigen Betrachtung wurde der äußere thermische Widerstand, d. h. der thermische Widerstand der Kühlarmatur, als vernachlässigbar klein angenommen. Wenn der Temperaturabfall über diesem Widerstand berücksichtigt wird, erhält man:

$$T_x - T_{Ra} = \frac{1}{\frac{2 \cdot A \cdot h_G \cdot \lambda}{x^2 \cdot U^2 \cdot G} - k_T} \quad (28)$$

mit $T_{Ra} = U^2 \cdot G \cdot R_a \quad (29)$

ergibt sich:

$$T_x = \left(\frac{1}{\frac{2 \cdot A \cdot h_G \cdot \lambda}{x^2 \cdot U^2 \cdot G} - k_T} + U^2 \cdot G \cdot R_a \right) \cdot \frac{1}{1 - k_T \cdot U^2 \cdot G \cdot R_a} \quad (30)$$

für den statischen Fall.

Zur Berechnung des äußeren thermischen Widerstandes spielen die Elemente mit einer nennenswerten Wärmekapazität eine Rolle, d. h. die Kupferscheibe und der Aluminiumkühlkörper. Die thermischen Übergangswiderstände und der thermische Widerstand der Elektrodenbleche werden als Elemente ohne integrierte Wärmekapazität betrachtet. Damit läßt sich das folgende thermische Ersatzschaltbild aufbauen. Der thermische Übergangswiderstand von der Heizflüssigkeit zur Elektrode, der thermische Widerstand einer Elektrode, der Übergangswiderstand zur Kupferscheibe und der halbe thermische Widerstand der Kupferscheibe in Energieflußrichtung bilden den Widerstand R_1 . Der zeitabhängige Querwiderstand $\frac{1}{j\omega C_{W1}}$ wird durch die Wärmekapazität

der Kupferscheibe gebildet. Der folgende Längswiderstand R_{w2} setzt sich aus dem halben thermischen Widerstand der Kupferscheibe, dem Übergangswiderstand zum Aluminiumkühlkörper und dem halben thermischen Widerstand dieses Kühlkörpers zusammen. Als zweiter Querwiderstand folgt die Wärmekapazität des Kühlkörpers $\frac{1}{j\omega C_{w2}}$. Parallel zu C_{w2} liegen der halbe thermische Innenwiderstand des Kühlkörpers und der thermische Übergangswiderstand zur Luft.

Dieses Ersatzschaltbild gilt nur, wenn die aufeinanderfolgenden Elemente alle nahezu gleichen Durchmesser und einen runden Querschnitt besitzen und wenn die Wärmeabführung senkrecht zur Hauptwärmeabfuhrichtung ausreichend gering ist.

Damit ergibt sich R_a zu

$$R_a = (R_{w3} \parallel \frac{1}{j\omega C_{w2}} + R_{w2}) \parallel \frac{1}{j\omega C_{w1}} + R_{w1} \quad (31)$$

$$R_a = R_{w1} + \frac{R_{w2} + R_{w3} \frac{1}{1+j\omega\tau_{32}}}{1+j\omega\tau_{21} + \frac{j\omega\tau_{31}}{1+j\omega\tau_{32}}} \quad (32)$$

Es bedeuten $\tau_{21} = R_{w2} \cdot C_{w1}$; $\tau_{31} = R_{w3} \cdot C_{w1}$; $\tau_{32} = R_{w3} \cdot C_{w2}$

Praktisch schwankt der zeitabhängige Wert von R_a zwischen den Größen $R_a = R_{w1}$ für $t = 0$ und $R_a = R_{w1} + R_{w2} + R_{w3}$ für $t = \infty$ beim Anlegen einer Sprungfunktion.

7.2.1 Leistungsaufnahme und Wirkungsgrad des vorliegenden elektromechanischen Wandlers

Für den Arbeitstemperaturbereich von 30 bis 50 °C, den effektiven Balgdurchmesser von 10 mm und den Volumenausdehnungskoeffizienten $\alpha = 1,1 \cdot 10^{-3}$ ergeben sich für die angeführten Ausdehnungswege folgende Volumina des Heizgefäßes

$s/\mu\text{m}$	2	20	120	180	2000
$\Delta V/\text{mm}^3$	0,157	1,57	9,44	14,1	157
V/mm^3	7,14	71,4	429	641	7140

für $2 h_G = 3 \text{ mm}$

ϕ/mm	1,74	5,5	13,5	16,7	55
$A_{\text{kühl}}/\text{mm}^2$	2,38	23,8	143	220	2380
$W_{\text{heiz}}/\text{Ws}$	0,264	2,64	15,84	23,76	264

Tab. 1

$A_{\text{kühl}}$ ist die Elektrodenfläche, die gleichzeitig für die Wärmeableitung genutzt wird.

Mit W_{heiz} wurde die Energiemenge bezeichnet, die nötig ist, um das vorhandene Alkoholvolumen bei idealer thermischer Isolation nach außen um zwanzig Grad zu erwärmen, bzw. den Balg um die Strecke s auszudehnen.

Für die vorliegende Anordnung, die durch den effektiven Balgdurchmesser und die Materialkonstanten des Alkohols charakterisiert ist, beträgt das Verhältnis von Geschwindigkeit zu Leistung

$$\frac{s}{P \cdot t} \bigg/ \frac{\mu\text{m}}{\text{Ws}} = \frac{V}{P} \bigg/ \frac{\mu\text{m/s}}{W} = 7,58 \frac{\mu\text{m}}{\text{Ws}} \quad (33)$$

Wenn die durch Kühlung abgeführte Wärmeleistung einer Kontraktionsgeschwindigkeit entsprechen soll, die zahlenmäßig gleich der maximalen Expansionsgeschwindigkeit ist, muß für die maximale Expansionsgeschwindigkeit eine Heizleistung aufgewendet werden, die genau doppelt so groß ist, wie die für den Fall der idealen Wärmeisolierung berechnete. Das bedeutet für das praktisch aufgebaute System, daß eine Geschwindigkeit von $\pm 0,1 \text{ mm/s}$ mit einer maximalen Heizleistung von $26,4 \text{ W}$, die technisch noch vertretbar ist, erreicht werden kann. Bei einem Zehntel dieser Geschwindigkeit für Heizen und Kühlen (d. h. $10 \mu\text{m/s}$) sinkt die maximal notwendige Heizleistung im gleichen Maße. Der elektronische Aufwand ist jedoch um ein Vielfaches geringer. Die Berechnung des Wirkungsgrades der Energietransfor-

mation von elektrischer Energie in kinetische hat keine praktische Bedeutung. Sie soll aber der Vollständigkeit halber nachstehend vorgenommen werden.

Bei der Bewegung eines Präparates mit dem Maximalgewicht von 50 p, wie es in der Mössbauerspektroskopie angenommen wird, ist der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{M \cdot s}{p \cdot t} \quad (34)$$

$$\eta = \frac{50 \cdot 7,58 \text{ p/um}}{1 \text{ W s}} = 3,72 \cdot 10^{-6}$$

Bei der zusätzlichen Benutzung von Kühlelementen sinkt der Wirkungsgrad der Anordnung noch weiter ab.

Die Grundform des Federbalges wurde bereits unter 5.2.2 beschrieben und begründet. Die Eignung eines Balges mit einem effektiven Durchmesser von 10 mm für Wege zwischen 2 und 2000 μm und die dafür erforderliche Wellenzahl wird nachfolgend untersucht.

s // μm	2	20	120	180	2000
s / d_{eff} / %	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,6$	$\pm 0,9$	± 10
s / r / %	$\pm 0,05$	$\pm 0,5$	$\pm 3,0$	$\pm 0,5$	± 50
n / 1	1	3	3	3	3 x 3

Tab. 2

Hierbei ist r der Radius der Halbkugelwellen des Federbalges. Für einen sehr großen Hub ist es nötig, einen Kompromiß zwischen der Anzahl n der Wellen und der Deformation der einzelnen Welle zu suchen. Bei dem Weg von 2 mm ist die Linearität geringer. Mit der Angabe 3 x 3 Wellen ist gemeint, daß praktisch drei Bälge mit je 3 Wellen hintereinander angeordnet sind. Die Querstabilität muß dabei durch zwei Zwischenspider erhöht werden. Für Transport und Lagerung können die verschlossenen thermohydraulischen Bewegungseinheiten Temperaturen zwischen - 40 und + 60 °C ausgesetzt werden, ohne Schaden zu leiden.

7.2.2 Festlegung der erforderlichen Konzentration des Elektrolyten

Im Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie [99] Band Nickel, Seite 585, ist eine Tabelle zur Bestimmung der Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Konzentration der alkoholischen Nickelchloridlösung und von der Temperatur vorhanden. Der gewünschte Widerstand der Zelle errechnet sich aus der erforderlichen maximalen Heizleistung von 26,4 W und dem maximal möglichen Heizstrom von 0,1 A zu 2,64 kOhm. Als mittlere Temperatur wird der Wert 30 °C angenommen. Mit den Abmessungen des Heizgefäßes 1,19 cm² Seitenfläche und 0,3 cm Dicke ist der Tabelle eine erforderliche Konzentration von 8,03 g Ni Cl₂ pro Liter Äthylalkohol zu entnehmen. Da es sich hier um eine Näherungsrechnung handelt, wird der gewünschte Widerstand der Zelle praktisch durch Abstimmen, indem man reinen Alkohol oder etwas konzentrierte Lösung zugibt und gleichzeitig den Widerstand unter Betriebsbedingungen mißt, hergestellt.

7.3 Dimensionierung der Wärmeabführung aus der Heizzelle

7.3.1 Luftkühlung der Heizzelle

Für die Abmessungen nach 7.1 entsprechend einer Maximalgeschwindigkeit von $v = 0,1$ mm/s und einer maximalen Heizleistung von 26,4 W beträgt die Querschnittsfläche des kreisrunden Heizgefäßes 119 mm² und die Länge desselben 3 mm. Mit der spezifischen Wärmeleitfähigkeit des Alkohols von $\lambda = 0,0018$ W/cm · grd beträgt der Wärmewiderstand des Gefäßes $R_{\text{ith}} = 700$ grd/W. Die höchste Temperatur ist in der mittleren Querschnittsebene vorhanden. Nach beiden Seiten fließen 13,4 W ab.

(Die Temperaturverteilung wird in 7.1 beschrieben). Der Wärmewiderstand der Elektrode beträgt bei einer Fläche von 120 mm² und einer Dicke von 0,5 mm mit der spezifischen Wärmeleitfähigkeit des Nickels von $\lambda = 0,92$ W/cm · grd 0,0453 grd/W.

Die Güte der thermischen Kopplung zwischen der Nickelelektrode und dem Aluminiumkühlkörper hängt von der Ebenheit und Rauigkeit der Grenzflächen ab. Durch eine dünne Schicht Silikonfett kann der Wärmekontakt verbessert werden. Es wird angenommen, daß der Temperaturabfall an der Grenzschicht beider Metalle entsprechend der Genauigkeit der vorliegenden Abschätzung vernachlässigbar gering ist. Als Kühlkörper (Aluminiumrippenkörper) zum Wärmetausch mit der nicht zusätzlich bewegten Luft, wird der Kühlkörper K200 A, der vom VEB Halbleiterwerk Frankfurt zur Kühlung von Halbleiterbauelementen angeboten wird, verwendet. Der effektive Wärmewiderstand, der dem Wärmeabfall zur Zimmertemperatur entspricht, wird mit 0,95 grd/W vom Hersteller angegeben. Damit ergibt sich im statischen Falle der Ableitung der maximalen Wärmeleistung ein Temperaturabfall über dem Kühlkörper von 12,5 °C und über der Nickelelektrode von 0,59 °C. Wenn die Zimmertemperatur 20 °C beträgt, errechnet sich die maximale Elektrodentemperatur zu ca. 33,1 °C. Ein Vergleich der Wärmekapazitäten von der Alkoholmenge im Heizgefäß der Nickelelektrode und des Aluminiumkühlkörpers zeigt, daß bei einem periodischen Heizen und Kühlen des Heizgefäßes die Temperatur am Aluminiumkühlkörper nur wenig schwanken wird.

Heizgefäß	$C_{\text{ges}} = 0,664$	Ws/grd
Elektrode	$C_{\text{ges}} = 0,021$	Ws/grd
Kühlkörper	$C_{\text{ges}} = 232$	Ws/grd

Das bedeutet, daß der mittlere Temperaturabfall am Kühlkörper nur etwa 6,25 °C beträgt.

7.3.2 Wärmeableitung mit luftgekühlten Peltierelementen

Durch Einfügen einer Peltierbatterie (Type 7141 vom VEB dkk Scharfenstein) zwischen die Nickelelektrode und den Aluminiumkühlkörper soll die Elektrodentemperatur unter die Zimmertemperatur gesenkt werden. Damit wäre ein größerer Temperatur-

gradient im Heizgefäß und damit eine größere Abkühlgeschwindigkeit erreichbar.

Die genannte Peltierbatterie hat eine Kühlfläche von $55 \times 55 \text{ mm}^2$. Zur Ankopplung an den geringeren Durchmesser der Heizelektrode wird eine Kupferplatte von 5 mm Dicke dazwischengelegt. Außerdem müssen sowohl die kalte als auch die warme Fläche des Peltierelementes elektrisch isoliert werden. Zu diesem Zweck wird eine Kunststoffzwischenlage benutzt, wie sie bei Leistungshalbleiterbauelementen üblich ist. Die thermischen Werte der Isolierschicht wurden aus einer Grafik für den Leistungstransistor GD 180 ermittelt. Danach besitzt die Isolierschicht einen thermischen Widerstand von ca. $0,0146 \text{ grd/W}$ für eine Fläche von $55 \times 55 \text{ mm}^2$. Auch hier kann der Wärmekontakt durch eine dünne Schicht Silikonfett verbessert werden. Für das genannte Peltierelement wird eine maximale Kühlleistung von 22 W und ein maximaler Temperaturunterschied zwischen der warmen und der kalten Seite von 67°C bei idealer Wärmeisolation beider Seiten angegeben, d. h., bei dem Temperaturunterschied von 67°C fließen 22 W über den thermischen Innenwiderstand der Batterie ab. Damit ergibt sich ein thermischer Innenwiderstand der Peltierbatterie von ca. $3,05 \text{ grd/W}$. Unter Vernachlässigung der nichtlinearen Kennlinie der Peltierbatterie ergibt sich für die abgeführte Wärmeleistung P_a näherungsweise der folgende Temperaturunterschied an derselben

$$\Delta T = R_{\text{ith}} P (P_{\text{max}} - P_a) \quad (35)$$

$$\Delta T = 3,05 (8,3 - 13,2) = - 15^\circ\text{C}$$

Es wird also keine Absenkung der Elektrodentemperatur erreicht. Der Wert $P_{\text{max}} = 8,3 \text{ W}$ ergibt sich aus dem Wirkungsgrad der Batterie und der für die Luftkühlung zulässigen elektrischen Leistung von ca. 11 W. Außerdem wird der Kühlkörper noch von der elektrischen Leistung, die in der Peltierbatterie in Wärme umgesetzt wird, belastet. Der thermische Widerstand der Kupferscheibe zur Flächentransmission wird hier mit kleiner als $0,105 \text{ grd/W}$ angenommen. Auch wenn man in Anbetracht der Wärmekapazität der Kupferscheibe eine mittlere Durchflußleistung

von 6,6 W errechnet sich die mittlere Elektrodentemperatur zu ca. 37,6 °C gegenüber 26,6 °C ohne Peltierelement.

7.3.3 Wärmeableitung mit wassergekühlten Peltierbatterien

Eine Wasserkühlung mit einer Kühlwassertemperatur von 18 °C gestattet die Ausnutzung der maximalen Wärmetransportleistung von 22 W, was einer mittleren elektrischen Leistung der Peltierbatterie von ca. 40 W entspricht. Es errechnet sich für die maximal abzuführende Wärmeleistung von 13,2 W eine maximale Elektrodentemperatur von - 2,7 °C und eine mittlere von - 26 °C. Leider verursacht die forcierte Wasserkühlung Erschütterungen im Aufbau, die nicht tragbar sind. Es bleibt also nur die Luftkühlung ohne Peltierbatterie übrig.

7.4 Elektromechanische und thermische Kennlinie des thermohydraulischen Wandlers

7.4.1 Das elektrische Verhalten der elektrolytischen Zelle

Das elektrische Verhalten der Zelle in den verschiedenen Spannungsbereichen ist mit dem bekannter elektrolytischer Systeme verschiedener Anwendungsgebiete vergleichbar. Unterhalb des Abscheidungs potentials der Ionen (d. h. unterhalb ca. 0,9 V) hat die Heizzelle die Eigenschaften einer Solionzelle (chemotronisches Bauelement) [94] [96] [97]

Bei Spannungen um 1 V können die Eigenschaften mit den Erkenntnissen der Polarografie erklärt werden. Im Bereich von 5...20 V ist die Zelle unmittelbar mit einem galvanischen Bad zu vergleichen. Bei höheren Spannungen sind z. B. in bezug auf die Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen und dem Elektrodenverhalten Vergleiche mit der Elektrophorese möglich.

Hieraus läßt sich ableiten, daß ein zeitlich inkonstanter Widerstand, der die Stabilität des Regelkreises beeinträchtigen könnte, nur bei Zellenspannungen unter dem Abscheidungs potential vorhanden ist. Es sollte bei einer Proportionalsteuerung auch in der Kühlphase die Restspannung über der Zelle

nicht unter 2 V absinken. Bei einer Zweipunktregelung sollte die Spannung nur in der Heizphase größer 2 V sein.

7.4.2 Die dynamischen Eigenschaften des thermohydraulischen Wandlers

Besonders für die Betrachtung des thermohydraulischen Wandlers als Element des Regelkreises ist die Kenntnis der Differentialgleichung, die die dynamischen Eigenschaften des Wandlers beschreibt, wichtig. Zur Aufstellung dieser Differentialgleichung geht man davon aus, daß die Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangsleistung, multipliziert mit der Zeit und dividiert durch die Wärmekapazität der Heizflüssigkeit, gleich der mittleren Gefäßtemperatur, vermindert durch den Temperaturabfall am thermischen Außenwiderstand, ist.

$$\frac{1}{C_w} \int_0^t (P_{inp} - P_{outp}) dt = \overline{T}(t) - R_a \cdot \frac{h_G}{R_i} \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=h_G} \quad (36)$$

Hierbei sind:

C_w die Wärmekapazität der Heizflüssigkeit

P_{inp} die Eingangsleistung

P_{outp} die Ausgangsleistung

$\overline{T}(t)$ die effektive Temperatur, der die thermische Ausdehnung der Heizflüssigkeit proportional ist

$\frac{R_i}{h_G}$ der thermische Innenwiderstand des Flüssigkeitsvolumens, bezogen auf die Längeneinheit

$\frac{dT}{dx}$ der Temperaturgradient in der Heizflüssigkeit unmittelbar an der Elektrodenfläche

Die effektive Temperatur errechnet sich zu

$$\overline{T}(t) = \frac{1}{h_G} \int_0^{h_G} T(x, t) dx \quad (37)$$

Unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit ergibt sich

$$\frac{1}{C_w} \int_0^t U^2 \cdot G (1 + k_T \cdot T) dt - \frac{1}{C_w} \cdot \frac{h_G}{R_i} \int_0^t \frac{dT}{dx} \Big|_{x=h_G} dt = \overline{T}(t) - R_a \cdot \frac{h_G}{R_i} \frac{dT}{dx} \Big|_{x=h_G} \quad (38)$$

Durch eine Differentiation nach der Zeit und einige Umformungen erhält man

$$\frac{1}{C_w} \cdot U^2 G + \frac{1}{C_w} \cdot U^2 G \cdot k_T \cdot \frac{1}{h_G} \int_0^{h_G} T(x,t) dx - \frac{1}{C_w} \cdot \frac{h_G}{R_i} \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=h_G} - \frac{d}{dt} \cdot \frac{1}{h_G} \int_0^{h_G} T(x,t) dx + \frac{d}{dt} \cdot R_a \cdot \frac{h_G}{R_i} \frac{dT}{dx} \Big|_{x=h_G} = 0 \quad (39)$$

Die Temperaturverteilung $T(x,t)$ im Heizgefäß erhält man nach einer im Prinzip ähnlichen Ableitung

$$T(x,t) = \frac{1}{C_w} \int_0^t P dt - \frac{h_G}{R_i} \int_0^t \frac{d^2 T}{dx^2} dt - R_a \cdot \frac{h_G}{R_i} \frac{dT}{dx} \Big|_{x=h_G} \quad (40)$$

Die Temperatur, vermehrt durch den Temperaturabfall am thermischen Außenwiderstand, wird bestimmt durch die eingespeiste Leistung, multipliziert mit der Zeit und dividiert durch die Wärmekapazität, und durch die im Längenelement infolge der Änderung des Temperaturgradienten zusätzlich abgeführte Wärmemenge. Eine weitere Umformung und eine Differentiation ergeben:

$$T(x,t) + R_a \cdot \frac{h_G}{R_i} \frac{dT}{dx} \Big|_{x=h_G} + \frac{h_G}{R_i} \int_0^t \frac{d^2 T}{dx^2} dt - \frac{1}{C_w} \int_0^t U^2 G (1 + k_T \cdot T) dt = 0 \quad (41)$$

$$\frac{dT}{dt} + \frac{U}{dt} \cdot R_a \cdot \frac{h_G}{R_i} \frac{dT}{dx} \Big|_{x=h_G} + \frac{h_G}{R_i} \cdot \frac{d^2 T}{dx^2} dt - \frac{U^2 G}{C_w} - \frac{U^2 G \cdot k_T}{C_w} \cdot T = 0 \quad (42)$$

Aus den Gleichungen ist ersichtlich, daß die Temperatur und damit die thermische Ausdehnung der Heizflüssigkeit linear

von der eingespeisten Leistung abhängt. Nichtlinearitäten werden vom komplexen Außenwiderstand und der Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit verursacht. Die Nichtlinearitäten der Wärmeleitfähigkeit und der thermischen Ausdehnung werden im betrachteten Bereich als vernachlässigbar angesehen.

8. Variationsmöglichkeiten des thermohydraulischen Systems in Form und Anwendung zu dessen multivalenter Nutzung

Für sehr langsame Bewegungen und kleine Wege kann das getrennte Heizgefäß eingespart werden. Der Federbalg wird dazu an Vorder- und Rückwand durch Elektroden abgeschlossen. Eine der Elektroden bildet die bewegliche Fläche. Über ein thermisch isolierendes Distanzstück wird der zu bewegend Körper angekoppelt. Die Stromzuführung zu dieser Elektrode muß über ein Stück spiralig gewendelte Litze oder über eine metallische Zentrierfeder (Bronzespider) erfolgen. Nur die feststehende Elektrode kann intensiv gekühlt werden. Ein derartiges mit Niederfrequenz betriebenes Element stellt die einfachste Form eines thermohydraulischen Bewegungssystems dar. Durch die Niederfrequenzheizung dehnt sich der Balg entsprechend der halben Periodendauer der Niederfrequenz in Stufen aus. Soll z. B. der vorgesehene Weg in einer Sekunde durchlaufen werden und beträgt die Frequenz des Heizstromes 10 kHz, so wird dieser Weg in 20 000 Stufen unterteilt. Die Inhomogenität dieser Bewegung beträgt also 0,005 % der Strecke pro Sekunde. Die Genauigkeit einer Positionseinstellung wird durch eine Wechselstromheizung nicht beeinträchtigt, da mit der Abweichung von der Sollposition auch die Korrekturschritte kleiner werden. Für die Stabilität des thermohydraulischen Bewegungssystems erscheint es günstig, Heizgefäß und Ausdehnungsgefäß unmittelbar aneinander anzuschließen. Für spezielle Anwendungen können beide Gefäße aber auch über eine lange, unelastische hydraulische Leitung miteinander verbunden sein. Diese Anordnung ist auch immer dann notwendig, wenn zwei oder mehrere Ausdehnungs-

gefäße an ein gemeinsames Heizgefäß angeschlossen werden sollen, z. B. um einen Modellregelkreis aufzubauen, wenn die das Objekt bewegende Ebene für den Meßfühler nicht zugänglich ist oder wenn eine hydraulische Untersetzung der Bewegung durchgeführt werden soll. Für die letzte Anordnung haben die Federbälge unterschiedliche effektive Durchmesser. Für die Berechnung des Heizgefäßes wird die Summe der Volumenvergrößerungen der einzelnen Ausdehnungsgefäße eingesetzt. Das Verhältnis der Ausdehnungswege der einzelnen Federbälge hängt nicht nur von dem Verhältnis der effektiven Durchmesser, sondern auch von den Federkonstanten der Federbälge ab. Diese Anordnung ist der unter 5.2.2 geschilderten ähnlich, wodurch das Fixieren einer Querschnittsebene eines Federbalges zwei Teilgeschwindigkeiten an den beiden Endflächen desselben erhalten werden konnten. (Abb. 11) Solche Bewegungen sind nötig, wenn z. B. optische Resonatoren oder die Elemente einer optischen Abbildungseinheit in einer variablen Anordnung abgestimmt oder nachgeregelt werden sollen, wobei die Elemente gegeneinander und die optische Baugruppe gleichzeitig gegenüber einer Ebene bewegt werden sollen. Die Benutzung eines Kollektives von drei thermohydraulischen Bewegungssystemen bietet sich für die Justierung der Oberfläche eines Objektes im mikroskopischen Strahlengang an. Automatisch oder von Hand kann die genannte Ebene u. U. nach der Schärfe dreier am Rand gelegener Testpunkte (oder Testfiguren) genau senkrecht zur optischen Achse eingetaumelt werden. Eine weitere Anwendung des thermohydraulischen Ausdehnungssystems stellt die homogene Bewegung mikroskopischer Objekte dar, z. B. zur Aufnahme mikrofotometrischer Spektren oder Modulationsfunktionen. In der Arbeit [108] wurde u. a. beobachtet, daß ein Feingetriebe hoher Präzision wie es z. B. zur Nachführung von Fernrohren verwendet wird, noch Inhomogenitäten beseitzt, die bei der Benutzung des Getriebes zum Vorschub eines Mikrogitters unter einem Mikroskop sichtbar werden, wenn die Hell-Dunkel-Übergänge der Striche kontinuierlich fotometriert werden. Das Anstoßen der Zahnflanken vor dem Ineinandergreifen wird auf den steilen Flanken der Hell-Dunkel-Übergänge

als Zacke sichtbar. Derartige Effekte sind bei der thermohydraulischen Bewegung nicht vorhanden.

Soll eine vorgegebene Position eingestellt werden, die durch eine Führungsgröße bestimmt wird, welche mindestens über einen minimalen Zeitraum konstant ist, kann das thermohydraulische Bewegungssystem in Verbindung mit einem Zweipunktregler benutzt werden. Die Genauigkeit der Positionierung ist hierbei von der Genauigkeit des verwendeten Meßfühlers abhängig.

Für die Steuerung des Heizgefäßes reicht im günstigsten Falle (Niederfrequenzheizung) ein Relais aus. Bei einer Gleichstromheizung sind mindestens drei Relais nötig (Abb. 12). Zum Erreichen einer großen Positioniergenauigkeit und -stabilität wird bei der Dimensionierung des Positionsreglers einem kleinen Wege eine große Temperaturdifferenz im Heizgefäß zugeordnet. Wählt man dagegen ein großes Heizvolumen, kombiniert mit einem vergleichsweise kleinen effektiven Querschnitt des Ausdehnungsgefäßes, ergibt sich für eine geringe Temperaturänderung eine entsprechend große Ausdehnung des Federbalges. Eine solche Anordnung ist sehr gut als Thermostat, z. B. für eine Transistor-schaltungseinheit, geeignet. Zu diesem Zweck setzt man eine solche Schaltungseinheit (evtl. Normalfrequenzgenerator) in ein kleines Gefäß aus vernickeltem Kupfer und füllt das Gefäß zum Zwecke eines guten Wärmekontaktes mit Silikonfett oder Silikonkautschuk. Das Kupfergefäß wird bis auf ein kleines Rohr für die Anschlußleitungen vollständig geschlossen und in ein elektrolytisches Heizgefäß getaucht. Durch die in der elektronischen Schaltung entwickelte Wärme und eine äußere Zusatzheizung durch das elektrolytische Heizgefäß erhöht sich die Temperatur auf ein gewünschtes Maß zwischen Zimmertemperatur und dem Siedepunkt des Alkohols. Die Temperatur wird durch ein normales Thermometer gemessen und die Flüssigkeitsausdehnung in einem Kompensationsgefäß aufgefangen. Wenn die gewünschte Temperatur erreicht ist, wird der Zugang zum Kompensationsgefäß gesperrt und der zum Meßfederbalg geöffnet. Der Meßfederbalg trägt einen Schwellwertschalter, der die Zusatzheizung im elektrolytischen Gefäß steuert. Mit dieser Anordnung

kann die Temperatur der Transistorschaltung über lange Zeit hochkonstant gehalten werden. Die Abkühlung des Heizgefäßes nach außen kann durch eine Korrektur der thermischen Isolation so eingestellt werden, daß ein Minimum an Heizleistung zum Betrieb des Thermostaten nötig ist. Die Vorteile eines solchen Thermostaten sind eine nicht durch Wärmeleitung verzögerte Heizung und damit eine sehr klein einstellbare Hysterese des Reglers, ein relativ kleines Gesamtvolumen und geringer schaltungstechnischer Aufwand. Im Folgenden werden zwei Dimensionierungsbeispiele beschrieben.

Beispiel 1:

Es besteht die Forderung, ein Objekt (Transistorschaltung) bis auf 10^{-2}°C temperaturstabil zu halten. Weiterhin wird ein optischer oder mechanischer Schwellwertschalter verwendet, der über eine Strecke von 0,2 mm sicher schaltet. Der effektive Durchmesser des Federbalges soll 10 mm betragen. Damit wird die erforderliche Volumenausdehnung $V = 3,98 \text{ mm}^3$. Das erforderliche Volumen des Heizgefäßes errechnet sich aus der Gleichung 23 zu $V = 367 \text{ cm}^3$.

Beispiel 2:

Erhöht man die Forderung der Temperaturstabilisierung auf 10^{-3}°C , müssen der effektive Balgdurchmesser auf die Hälfte und der Arbeitsbereich des Schwellwertschalters auf 20 μm herabgesetzt werden. (Für den Schwellwertschalter kommt nur eine optische Anordnung in Frage). Das notwendige Volumen des Heizgefäßes errechnet sich zu $V = 362 \text{ cm}^3$.

9. Die Kontrolle der erzeugten Feinbewegung

9.1 Meßfühleranordnung zur Kontrolle der erzeugten Bewegung

9.1.1 Beschleunigungsmesser

Wie unter Punkt 2.3.1 angeführt wurde, werden Mössbauerspektren sowohl mit Relativbewegung zwischen Quelle und Absorber mit konstanter Geschwindigkeit als auch mit konstanter Beschleunigung

aufgenommen. Es ist in beiden Fällen möglich, die Bewegung durch einen Beschleunigungsaufnehmer zu kontrollieren, d. h. das Signal des Beschleunigungsmessers dem Regelkreis zuzuführen. Dabei entsteht am Beschleunigungsmesser nur dann ein Signal, wenn sich die Geschwindigkeit durch die Störgröße ändert. Die Änderungen unter eine bestimmten Änderungsgeschwindigkeit (schleichende Verschiebung) und der Absolutwert der Geschwindigkeit werden bei der Verwendung eines Beschleunigungsaufnehmers als Meßfühler nicht berücksichtigt. Ein Beschleunigungsaufnehmer als Meßfühler ist nur dann anwendbar, wenn Störgrößen impulsartiger oder periodischer Natur mit einer Impuls- oder Periodendauer kleiner als die Periodendauer der Bewegung ausgeregelt werden müssen. Zur Realisierung vorgegebener Regelkreiseigenschaften ist es oft erforderlich, Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Wegsignal mit verschieden einstellbarer Amplitude zu mischen. Dazu können die Signale durch elektronische Differentiation aus dem Wegsignal oder durch getrennte Aufnehmer der einzelnen Größen gemessen werden.

Den größten Informationsgehalt hat das Wegsignal. Die Genauigkeit der analog ableitbaren Größen für die Geschwindigkeit und die Beschleunigung ist oft nicht groß genug. So wird z. B. bei Mössbauerspektrometern mit elektrodynamischem Bewegungssystem bei einer Variante mit einer Induktionsspule ein analoges Signal für die Geschwindigkeit und mit zwei optischen Spalten ein digitales Wegsignal erzeugt und zur Regelung ausgenutzt. Damit kann die Wegstrecke mit hoher Genauigkeit und Reproduzierbarkeit eingehalten werden. Eine schleichende Trift ist nicht möglich. Der Vorteil des Geschwindigkeitsdetektors ist der, daß das abgegebene Signal mit der Geschwindigkeit anwächst, d. h. kurze Impulse, die besonders hohe Geschwindigkeitskomponenten beinhalten, werden im Regelkreis stärker wirksam. Sowohl bei der Auswahl des Beschleunigungsmessers als auch bei der der Geschwindigkeitsaufnehmer und Wegmesser wurde davon ausgegangen, daß das Regelsignal die Information jeder Zeiteinheit enthalten muß. Die Interpolation des Signals aus digitalen Meßwerten stellt eine punktweise Abtastung dar, die Pausen

enthält, in denen ein Teil der Information verlorengeht. Außerdem soll sowohl das Steuersignal als auch das Regelsignal vollständig homogen sein, um das Spektrum der überlagerten Störgeschwindigkeiten von vornherein schmal zu halten.

In der Abb. 14 werden zwei zur Diskussion ausgewählte Formen der Beschleunigungsaufnehmer angeführt. Es handelt sich um ein Feder-Masse-System und um eine chemotronische Anordnung. Das Feder-Masse-System ist zur Erzeugung eines elektrischen Ausgangssignals entweder mit einem Wegmesser oder mit einem Druckmesser (z. B. Druckwandler mit Quarzkristall) verbunden. In der in dieser Arbeit beschriebenen Apparatur beträgt die maximale Periodendauer ca. 1000 s. Es ist nicht möglich, ein Feder-Masse-System mit einem Volumen von nur wenigen Kubikzentimetern und einen Quarzdruckwandler für eine nutzbare Meßzeit (Periodendauer) von ca. 1000 s herzustellen. Für einen solchen Zweck erscheint ein chemotronischer Beschleunigungsaufnehmer eher geeignet, obwohl in der Literatur beschriebene Konstruktion auch keine so hohe Meßperiodendauer gestatten. Ein chemotronischer Beschleunigungsaufnehmer besteht im Prinzip aus zwei in der Bewegungsrichtung des Aufnehmers elastischen Gefäßen, die durch eine Kapillare miteinander verbunden sind. Bei einer Beschleunigung des Aufnehmers strömt Flüssigkeit durch die Kapillare aus dem einen Gefäß in das andere. Die Flüssigkeit wird z. B. durch eine wäßrige Kaliumjodidlösung gebildet. In der Kapillare sind drei Platinelektroden eingeschmolzen, die zwei elektrolytische Strecken bilden. Wenn die Flüssigkeit in der Kapillare in der einen oder anderen Richtung verschoben wird, ändern sich die Ionenkonzentrationen der beiden Strecken und damit deren Widerstände entgegengesetzt. Beide elektrolytische Strecken werden mit ihren Arbeitswiderständen in einer Brückenschaltung betrieben und das Signal über einen Differenzverstärker abgenommen. Die maximale Betriebsspannung des chemotronischen Wandlers darf 0,9 V nicht überschreiten, da seine Kennlinie bei höheren Spannungen nichtlinear ist. Die untere Frequenzgrenze wird durch die

Rekombinationsgeschwindigkeit der Ionen und die Größe der Vorratsgefäße bestimmt. Wenn das ganze chemotronische System fest aufgebaut und eine elastische Begrenzungswand eines der Vorratsgefäße mit dem Bewegungssystem verbunden wird, arbeitet die Anordnung in einem bestimmten Frequenzbereich als Geschwindigkeitsaufnehmer und in einem höheren Frequenzbereich als Wegmesser. Leider ist eine solche chemotronische Anordnung über einen breiten Frequenzbereich mit der geforderten Genauigkeit von 0,1 % nicht beherrschbar.

9.1.2 Geschwindigkeitsdetektoren

Wie auch unter Punkt 9.1.3 festgestellt wird, soll das Regelsignal eine homogene Analoggröße sein. Durch eine mechanische Belastung des Gebers mit dem Meßfühler ist besonders bei dem Vorhandensein einer gleitenden Reibung (Gleitbahn oder Gelenk) die Gefahr gegeben, daß z. B. durch den stick-slip-Effekt eine periodische Bewegung überlagert wird. Deshalb besteht die Forderung nach einer berührungslosen Geschwindigkeitsmessung. Diese Forderungen erfüllt nur ein elektrodynamischer Geschwindigkeitsmesser, wie ihn z. B. ein dynamisches Mikrofon darstellt. Dabei ist es gleichgültig, ob der elektrische Leiter oder der Magnet relativ zur Apparatur bewegt werden. Wie im Punkt 2.2.2.12 dargelegt wurde, liegt die untere Empfindlichkeitsgrenze eines dynamischen Geschwindigkeitsgebers höher als für die in dieser Arbeit beschriebene Apparatur notwendig ist.

Die in der Abb. 15 angeführten digitalen und indirekten Geschwindigkeitsmeßmethoden werden nicht für Regelzwecke, sondern für die Eichung der Apparatur und für den Nachweis der Breite des Momentangeschwindigkeitsspektrums benötigt. In [115] wird ein graviertes Strichgitter ($8 \mu\text{m}$), das an dem bewegten Teil des Gebers befestigt ist, mit einem Spiegel auf sich selbst abgebildet. Je nachdem, ob Striche aufeinanderfallen oder Striche auf die Zwischenräume, ergibt sich für einen Fotodetektor Helligkeit oder Dunkelheit. Ein nachgeschalteter

elektronischer Schwellwertschalter erzeugt Impulse, deren Abstände mit einem Zählfrequenzmesser (quarzgesteuerter Zähler, der von den Meßimpulsen über eine Torstufe geschaltet wird) ausgemessen werden können. Eine feinere Unterteilung der Bewegungsstrecke erhält man bei der Verwendung einer Interferometereinrichtung anstelle des Strichgitters (siehe Anlage 1). Unter Scanningmethoden sollen Anordnungen verstanden werden, wo Markierungen, deren Abstand viel größer als ihre Breite ist, zur genauen Wegmessung verwendet werden. Die aufgeführten optischen Markierungen können auch durch magnetische auf einem Magnetband, einem Magnetdraht oder einer aufgetragenen Magnetschicht ersetzt werden.

Die Homogenität einer Bewegung kann mit Hilfe von holografischen Abbildungen mit der Messung optischer Resonanzfluoreszenz und mit der Messung der Kernresonanzfluoreszenz als Linienverbreiterung bzw. Abbildungsunschärfe gemessen werden. Es kommt bei den Resonanzfluoreszenzmessungen zu einer Überlagerung des Spektrums der Häufigkeitsverteilung der Momentangeschwindigkeiten und der Resonanzlinie. [109] ... [116]

9.1.3 Wegmesser

Bei sehr kleinen Geschwindigkeiten ist die Wegmessung die günstigste Methode zur Gewinnung eines Signals für die Geschwindigkeitsregelung. Dabei kann die Regelanordnung als Korrektur der nur langsam veränderlichen Momentanposition des Geschwindigkeitsgebers betrachtet werden. Zu dieser Betrachtungsweise berechtigt auch der Abstand der Zahlenwerte der dynamischen Zeitkonstanten der bewegten Teile von der Arbeitsperiodendauer des Systems. [117] ... [122]

9.1.3.1 Dehnungsmeßstreifen

In der Abb. 16 ist unter den analog arbeitenden Wegmessern zuerst der Dehnungsmeßstreifen angeführt worden. Nach [123] kann ein Halbleiterdehnungsmeßstreifen auf eine Feder, z. B. auf den Arm einer Zentrierfeder (Spider), aufgesetzt werden.

In Verbindung mit einer Meßbrücke erhält man ein entsprechendes Wegsignal. Die Meßbrücke wird mit 1,8 kHz Rechteckspannung betrieben. ~~Sie~~* wird mit 0,5 % über 250 μm angegeben. Die Linearität der Anordnung hängt von der Lage und der Dimensionierung des Federarmes ab.

9.1.3.2 Fotodiskriminator

In [124] wird ein Fotodiskriminator angeboten. Für dieses fotoelektrische Bauelement werden folgende Eigenschaften angegeben.

Type REP-11-D

Hochdotierter Ge-Halbleiter mit zwei diffundierten Emittern und einem gemeinsamen Kollektor

Abstand der Fotodioden 50 μm

Abtastlichtspaltbreite 100 μm

Arbeitsbereich 0...100 μm

9.1.3.3 Laterales Fotoelement

Das laterale Fotoelement [125] gibt einen Strom ab, der vom Einfallsort des Lichtstrahls auf dem Element abhängt. Die Kennlinienform ist bei der Herstellung festlegbar.

9.1.3.4 Wegmesser auf der Grundlage des Halleffektes

In der Sowjetunion wurde im Leningrader Institut für Flugzeugbau und dem CKS Institut für Halbleiter АН СССР (МТАН) ein elektromagnetisches Bauelement МПТ-1 entwickelt, das den Halleffekt zur Wegmessung ausnutzt.

Die angegebenen Daten sind folgende:

Arbeitsbereich: $> 0,01 \mu\text{m} \dots 500 \mu\text{m}$

Auflösung: 1 nm

Empfindlichkeit: 0,25 mV/ μm

Linearitätsbereich: 200 μm

*Die Genauigkeit

Temperaturkoeffizient: 0,4 ‰ pro Grad

Abmessungen: 2 x 1 x 0,05 mm

Material: Indiumarsenideinkristall

Leider war es nicht möglich, ein Muster dieses Bauelementes zu erhalten. [126]

9.1.3.5 Pneumatische Wegmessung

Die pneumatische Wegmessung hat den Nachteil, daß der Luftstrom oszillierenden Charakter hat. Außerdem wird durch den Luftstrom auf das bewegte Teil des Geschwindigkeitsgebers eine Kraft ausgeübt, der diese Schwingungen des Luftstroms auch überlagert sind. Deshalb scheiden die pneumatischen Wegmesser für die Verwendung im vorgesehenen Geschwindigkeitsgebersystem aus.

9.1.3.6 Differentialtransformator

Induktive Weggeber nach dem Prinzip des hochfrequenzgespeisten Differentialtrafos, wie sie in verschiedenen Feintastern verwendet werden, haben über den Bereich von $\pm 0 \dots 50 \mu\text{m}$, u. U. auch bis $500 \mu\text{m}$, die erforderliche Stabilität und Linearität der Kennlinie. Es besteht aber die Gefahr, daß sich die HF-Schwingungen des Differentialtransformators durch das mechanische Moment, welches sie auf den beweglichen Ferritkern ausüben, als mechanische Schwingungen auf den bewegten Teil des Geschwindigkeitsgebers übertragen. Dabei können u. U. mechanische Teile auf ihren Ultraschallresonanzfrequenzen angeregt werden [127] ... [129]

9.1.3.7 Differentialkondensator

Die gleiche Gefahr besteht bei HF-Differentialkondensatoren, wenn die Kondensatorplatten senkrecht zur Bewegungsrichtung stehen. Für einen Differentialmeßkondensator mit Platten parallel zur Bewegungsrichtung für einen Weg von $\pm 20 \mu\text{m}$

ergeben sich sehr kleine Plattenausmaße, wenn die relative Änderung der Kapazität über den genannten Weg mindestens 50 % betragen soll. Weiterhin muß bei solchen kleinen Flächen mit sehr hohen Frequenzen gearbeitet werden.

Die höchste mit Differentialtransformatoren erreichbare Arbeitsfrequenz - entsprechend dem gegenwärtigen Stand der Technik - beträgt ca. 20 kHz. Mit Differentialkondensatoren kann bei wesentlich höheren Arbeitsfrequenzen gearbeitet werden (zwei Größenordnungen und mehr). Für einen Bewegungsbereich von 20 μm würden sich die folgenden Abmessungen ergeben:

Die bewegliche Elektrode wird auf einen Präzisionsglaszylinder mit dem Durchmesser von 2 mm in einer Breite von 80 μm aufgedampft. Die beiden äußeren Elektroden werden im Inneren eines gläsernen Hohlzylinders aufgedampft. Zu diesem Zweck wird eine 0,2 mm breite ringförmige Schicht mit einem Gravierstichel so in zwei gleiche Ringe geteilt, daß ein Abstand von 50 μm zwischen den Ringen entsteht. Der Abstand zwischen den Belägen des beweglichen und des festen Teiles soll 50 μm betragen (Abb. 17 a). Der Belag des beweglichen Teiles wird geerdet. Der Differentialkondensator Abb. 18 bildet mit den beiden Lufttrimmern (C_1 und C_2) eine Brückenschaltung. Der Maximalwert der beiden Teilkapazitäten des Differentialkondensators beträgt in der genannten Dimensionierung $C_{\text{max}} = 2,18 \text{ pF}$ und der Minimalwert $C_{\text{min}} = 1,09 \text{ pF}$. Die Kapazität der beiden festen Beläge gegeneinander und gegen das Gehäuse sowie der Randeffect wurden für diese Betrachtung vernachlässigt. Für die angenommenen Blindwiderstände der beiden Teilkapazitäten von $R_{\text{min}} = 1 \text{ k}\Omega$ und $R_{\text{max}} = 2 \text{ k}\Omega$ errechnet sich eine Arbeitsfrequenz von ca. 7,3 MHz. Prinzipiell könnte die zur Verfügung stehende Gegentaktspannung der Meßbrücke auf einen Differenzverstärkereingang gegeben werden. Auf Grund der zu erwartenden Phasenverschiebungen wird es aber vorgezogen, das Signal erst durch einen hochohmigen Lineargleichrichter gleichzurichten. Der verwendete HF-Generator

muß amplitudenstabilisiert sein und wird über einen Impedanzwandler niederohmig an die Meßbrücke angeschlossen. Die Lineargleichrichter müssen in unmittelbarer Nähe (wenige Millimeter) des Differentialkondensators angeordnet werden. Diese Lösung ist aussichtsreich, jedoch mit einer z. T. neuen Technologie verbunden, so daß die Lösung eines optischen Analoggebers, die im Folgenden noch beschrieben wird, vorgezogen wurde.

Bei dem zuerst erwähnten Kondensator mit den Platten senkrecht zur Bewegungsrichtung wurde die wegproportionale Kapazitätsänderung durch eine Änderung des Plattenabstandes erreicht. (Abb. 17) In der bekannten Kondensatorformel

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d_p} \quad (43)$$

wo C die Kapazität

A die wirksame Fläche

d_p der Plattenabstand und

ϵ die Dielektrizitätskonstante

sind, steht der Plattenabstand im Nenner, d. h., die Änderung der Kapazität mit dem Plattenabstand ist bei einem Einzelkondensator nichtlinear. Beim Differentialkondensator wird diese Nichtlinearität kompensiert.

Wenn die Platten des Differentialkondensators parallel zur Bewegungsrichtung stehen, wird die Kapazitätsänderung durch eine Veränderung der wirksamen Kondensatorfläche erreicht. Hierbei besteht prinzipiell ein linearer Zusammenhang, der nur durch einen Randeffect gestört werden kann. Bei dem angeführten Dimensionierungsbeispiel sind die äußeren Beläge viel breiter als der innere Belag. Außerdem nähert sich die Kante des Belages des beweglichen Teiles nur bis auf 10 μ m einer Kante des äußeren Belages, d. h. 50 % der Maximalbedeckung. Damit ist kein wesentlicher Randeffect zu erwarten. Schon geringe Bewegungen (Schwingungen) der Platten senkrecht zur Bewegungsrichtung erzeugen ein Fehlersignal im Regelkreis,

mit dem der Bewegungsgeber beaufschlagt wird.

Auch durch eine Veränderung des Dielektrikums kann eine wegabhängige Kapazitätsvariation in einem Differentialkondensator erreicht werden. Eine solche Anordnung stellt das Analogon zum Differentialtransformator mit beweglichem Ferritkern dar. Der Vorteil einer solchen Anordnung besteht in der Möglichkeit der Verwendung hoher Frequenzen. Die Nachteile sind größere Temperaturabhängigkeit (z. B. bei der Verwendung von Epsilon) und größere Störanfälligkeit gegen äußere elektrische Felder und elektrische Leiter, die in der Nähe vorhanden sind.

9.1.3.8 UHF-Wegmesser

Eine weitere Möglichkeit der berührungslosen analogen Messung kleiner Wege besteht darin, die Wechselwirkung einer abgestrahlten elektromagnetischen Welle im UHF-Bereich, die an einer zu beobachtenden bewegten Fläche reflektiert wird, mit dem Strahler (Antenne) meßtechnisch zu erfassen und in ein Analogsignal zu verwandeln. Diese Möglichkeiten wurden in der FE-Arbeit Mikrowellen II (TH Ilmenau und VEB Carl Zeiss Jena 1969) untersucht. Der Aufwand des UHF-Generators, der Wellenleiter und des Strahlers scheint zu groß zu sein. [130] [131]

9.2 Optisch-elektronischer, analog arbeitender Wegmesser

9.2.1 Prinzipielle Anordnung der mechanischen und optischen Elemente des Wegmessers

Für den praktischen Aufbau wurde ein optischer Analoggeber benutzt, dessen Grundprinzip auf der veränderlichen teilweisen Abdeckung eines Rechteckfensters durch eine optisch undurchlässige Fläche beruht. Wenn die Veränderung der Größe der abgedeckten Fläche linear von der zugehörigen Verschiebung in der vorgesehenen Bewegungsrichtung abhängen soll, müssen die Kanten des Recht-

eckfensters, die parallel zur Bewegungsrichtung verlaufen, zueinander parallel sein. Außerdem muß der Lichtstrom durch jedes Flächenelement des Fensters gleich groß sein. Eine solche Anordnung wird in [132] beschrieben. (Abb. 20) Die Linearität und Welligkeit der Kennlinie dieses mechanisch-optischen Wandlers hängt davon ab, inwieweit es gelingt, Streulicht (besonders bei stark abgedecktem Rechteckfenster) und Reflexe von dem Fotodetektor fernzuhalten. Das wird durch eine optische Abbildung der abdeckenden Fläche auf das Abdeckfenster, durch eine Reihe von Streulichtblenden im Tubus, eine Objektfeldblende, eine Aperturblende vor der Lichtquelle, eine Streufolie vor dem Fotodetektor und durch die Verwendung von Spiegelobjektiven erreicht. Abb. 21 zeigt die prinzipielle Anordnung des genannten mechanisch-optischen Wandlers.

Die Lichtquelle L wird durch den Kollektor K in die Aperturebene des Kondensors O 1 hinein abgebildet. Die Feldblende B 2 hat die Größe des Fensters und wird durch den Kondensor O 1 auf die bewegliche Abdeckfläche A abgebildet. Durch das Objektiv O 2 werden die Abdeckfläche und das Bild der Feldblende auf dem Fenster F abgebildet. Dabei kommen Feldblende und Fenster (bei entfernter Abdeckfläche) zur Deckung. Die Aperturen der Beleuchtungseinrichtung, des Kondensors und des Objektives sind gleich. Durch eine Reihe von Streulichtblenden wird verhindert, daß das an der Tubuswand reflektierte Streulicht unmittelbar auf das Fenster treffen kann.

Durch die Verwendung einer Opalglaslampe oder zumindest einer Mattglaslampe können die Lichtstromunterschiede durch die einzelnen Flächenelemente verringert werden. Eine weitere Verbesserung der Gleichmäßigkeit der Lichtstromverteilung über die Fensterfläche kann dadurch erreicht werden, daß nur ein kleiner Teil der mit der Lichtquelle und dem Kondensor ausleuchtbaren Fläche ausgenutzt wird. Dabei wird aber ein ebenso kleiner Teil des Lichtstromes der Lichtquelle ausgenutzt. Deshalb füllt man die ganze nutzbare Abbildungsfläche mit parallel arbeitenden Fenstern und Abdeckflächen aus. Auf diese Weise gelangt man zu einer Strichgitteranordnung, die nicht wie in der digitalen Winkel- und Längenmessung über eine große Anzahl von

Strichen hinweg, sondern nur in einem Teil des Zwischenraumes zwischen zwei benachbarten Strichen arbeitet.

9.2.2 Die praktische Ausführung der beweglichen Gitterblende

Es wird als bewegte Abdeckfläche ein in Aluminium graviertes Strichgitter benutzt. Die Aluminiumschicht von $0,05 \mu\text{m}$ Dicke wurde auf planparalleles optisches Glas der Dicke $0,5 \text{ mm}$ aufgedampft. Der Abstand der Striche ist genau gleich der Strichbreite gleich $60 \mu\text{m}$. Dieser Abstand ergibt sich aus der erforderlichen Wegstrecke und der Kennlinie des mechanisch-optisch-elektrischen Wandlers. Die Wegstrecke wurde für eine Minimalgeschwindigkeit des thermohydraulischen Bewegungssystems von 20 nm/s als Kompromiß zwischen der elektronisch zu realisierenden Periodendauer der Führungsfunktion und dem meßtechnisch ausreichend genau zu erfassenden Weg auf $20 \mu\text{m}$ festgelegt. Die maximale Periodendauer ergibt sich dann zu 1000 s .

9.2.3 Die Eigenschaften des optischen Wegmessers

Die Eigenschaften des analog arbeitenden optischen Wegmessers wurden auf die folgende Weise bestimmt:

Ein graviertes Metall-Strichgitter mit einer Gitterkonstanten von $20 \mu\text{m}$ wurde unter ein Mikroskop gelegt, das nur mit einem Spiegelkondensor $0,6$ und einem Spiegelobjektiv $40 \times 0,65$ ausgerüstet war. Als Lichtquelle diente eine Hochdruckquecksilberdampflampe HBO 50, die mit einem Planspiegel in den Strahlengang des Mikroskops eingespiegelt wurde. Mit diesem Aufbau wurde das Bild des Strichgitters über eine Entfernung, die ein Mehrfaches der Mikroskoptubuslänge ausmachte, in einer 200fachen Vergrößerung auf eine Fotoplatte (ORWO DU 3) projiziert. Nach einer sehr harten Entwicklung der Fotoplatte wurde diese bzw. eine Metallkopie von ihr (sog. C-Kopie) wieder in die Projektionsebene gebracht. Mittels einer Meßschraube konnte die Platte ausreichend genau gegenüber der Projektion verschoben werden. Die durch die Platte hindurchtretende Lichtmenge wurde mit einem SEV M12FS35 und einem nachgeschalteten Digitalvoltmeter

gemessen. Dabei mußten folgende Punkte beachtet werden:

1. Die im Mikroskop eingebaute Lichtquelle konnte nicht benutzt werden, weil sich durch die Erwärmung die Schärfeneinstellung kontinuierlich veränderte.
2. Im SEV-Meßkopf muß auf eine gute Abschirmung und einen hohen Isolationswiderstand des Trägermaterials geachtet werden.
3. Nur besonders triftarme SEVs eignen sich für eine Kombination mit einem Digitalvoltmeter. Dabei spielt nicht nur die Trift des Dunkelstromes nach einer starken Belichtung eine Rolle, sondern auch die Eigenschaft, daß bei einem Helligkeitssprung im Arbeitsbereich die Empfindlichkeit erst langsam ansteigt, dann stark absinkt und sich danach wieder ansteigend in einer Exponentialfunktion dem Endwert, der zwischen den Extremwerten des Anstieges und Abfalles liegt, asymptotisch annähert. Dieser Vorgang erstreckt sich über etwa 5 bis 20 Sekunden und ist bei den SEV-Typen M12FS52 und M10 FS29 besonders ausgeprägt vorhanden. Diese Eigenschaft wirkt sich auch regelungstechnisch sehr ungünstig aus.
Da die Katodenempfindlichkeit des SEV über die Katodenfläche mehr als 50 % schwankt, muß dafür gesorgt werden, daß nahezu jeder Punkt der Katodenfläche von jedem Punkt der Fensterfläche einen Lichtanteil erhält, was durch Einfügen einer Streufolie in den Strahlengang in einem gewissen Abstand vor der Fotokatode geschieht.
4. Zur Messung eignete sich als Lichtquelle nur eine Glühfadenlampe, die aus einem elektronisch stabilisierten Netzgerät gespeist wurde.
5. Für die Abbildung unter den extremen Bedingungen des hohen Kontrastes und der spiegelnden Oberfläche von aufgedampften Metallgittern und durch die Genauigkeitsanforderungen kommen nur Spiegelobjektive in Frage. Objektive mit Glaslinsen (besonders als Frontlinse) zeigen Reflexe an verschiedenen Glasebenen.

Mit der beschriebenen Anordnung wurde die Kurve Abb. 19 aufgenommen. Der nichtlineare und inhomogene Hell-Dunkel-Übergang, der durch die begrenzte Auflösung und durch Beugungseffekte verursacht wird, hat eine Breite von ca. $6 \mu\text{m}$. Im verbleibenden mittleren Teil der Kennlinie ist die Linearität ausreichend. Durch die mehrfache Verlängerung der normalen Bildweite sind größere Objektivfehler zu erwarten, die im Ergebnis enthalten sind.

Die Eigenschaften des Hell-Dunkel-Überganges einer in eine dünne Metallschicht gravierten Kante in ihrer Projektion wurden auch auf die folgende Weise untersucht. Ein graviertes Metallgitter mit einer Gitterkonstanten von $0,1 \text{ mm}$ wurde etwa 370fach vergrößert auf eine Fotoplatte (Diaplatte DU3) projiziert. Die entwickelte Fotoplatte wurde mit einem CZ-Schnellfotometer untersucht. Es ergab sich eine Breite der Übergangszone von ca. $6,6 \mu\text{m}$. Dabei ist die Kennlinie des Fotomaterials zu berücksichtigen. Es kommt besonders bei den Extremwerten "durchlässig" und "schwarz" zu einer von der Belichtungszeit abhängenden Kompression der Übergangskurve, so daß eine breitere Übergangszone zu erwarten ist als mit dieser Methode gemessen wurde.

Da die durch Beugung verursachte Welligkeit der Hell-Dunkel-Übergangszone bei monochromatischem Licht am größten ist, wurde keine Farbfilterung des Lichtes vorgenommen und mit dem gesamten Spektrum der Glühlampe gearbeitet.

9.2.4.1 Versuch zur Auswahl eines geeigneten Abbildungsobjektives

Auf den Objektstisch eines Mikroskopes wurden nacheinander zwei Prüfplatten gelegt. Die erste Platte war halbseitig mit Chrom bedampft. Die Meßkante der Chromschicht war graviert. Die zweite Platte besaß eine Chromschicht mit einem Fenster in der Mitte, auf dem sich ein graviertes Strichgitter befand. Alle Strukturen waren viel größer als die maximal vom Objektiv erfaßten Bildfelder. Es wurden verschiedene Objektivtypen in das Mikroskop eingesetzt und die Beleuchtungseinrichtung

(Durchlicht) und der Kondensor jeweils optimal angepaßt bzw. justiert. Das Okular (6x) wurde nicht ausgetauscht. Es wurden folgende Effekte festgestellt:

Beim Verschieben des Bildfeldes über die halbseitig bedampfte Platte ändert sich die mittlere Bildhelligkeit mit der Annäherung der gravierten Kante an das Bildfeld, auch wenn diese noch sehr weit vom ausgenutzten Bildfeld entfernt ist. Dieser Effekt wird durch Streulicht im Tubus hervorgerufen.

Stellt man die zweite Platte mit dem Strichgitter so ein, daß eine Ecke* des Strichgitters etwa ein Viertel des Bildfeldes ausmacht und die anderen Dreiviertel durch die Metallschicht abgedeckt sind, werden bei allen Mikroskopobjektiven außer Spiegelobjektiven mehr oder weniger Reflexe der Gitterecke sichtbar. Es wandert bei einer Gitterverschiebung eine Gitterabbildung gleicher Größe wie das Originalgitter in entgegengesetzter Richtung. Außerdem sind verkleinerte Abbildungen und zur optischen Achse hin stark verzerrte Abbildungen festzustellen, die sich überlagern. Dadurch wird die Kennlinie des elektrooptischen Wegmessers wellig und gekrümmt. Das Spiegelobjektiv 40/0,65 ist nahezu frei von den geschilderten Effekten, was auf den großen Arbeitsabstand und ein Minimum an spiegelnden Glasoberflächen zurückgeführt werden kann. Spiegelobjektive besitzen außerdem Fassungen, die durch einen großen Innendurchmesser und durch Streulichtblenden eine Tubusinnenbeleuchtung vermeiden. Es erwies sich als günstig, die hochglanzpolierten Vorderflächen der Objektivfassungen matt schwarz abzulackieren. Die Fotometrie der oben beschriebenen Testplatten stellt in bezug auf Kontrast und Oberflächenreflexion des Objektes die schwersten denkbaren Bedingungen. Sie sind mit denen der Fotometrie z.B. biologischer Objekte nicht zu vergleichen.

9.2.4.2 Die Auflösung des ausgewählten Objektivs

Für die Abschätzung der zu erwartenden Auflösung eines Mikroskopobjektives wird üblicherweise die folgende Formel benutzt. Für Meßzwecke gilt, daß die Anzahl der aufgelösten Linien pro Millimeter gleich der numerischen Apertur multipliziert mit

*rechtwinklige Begrenzung der Fläche mit gravierten Linien

500 L/mm ist. Bei einer zulässigen Kontrastminderung von 40 % steigt die Zahl der aufgelösten Linien auf das Sechsfache. Die beiden verwendeten Spiegelobjektive haben eine numerische Apertur von 0,65. Damit ergibt sich eine Auflösung von 325 Linien pro Millimeter oder eine theoretische Hell-Dunkel-Übergangszone von maximal $3,08 \mu\text{m}$. Bei dieser überschlägigen Berechnung finden die Eigenschaften der speziellen Objektivtypen und Exemplarstreuungen keine Berücksichtigung. Wenn eine Kontrastminderung von 40 % zugelassen wird, erreicht die Auflösung die Größenordnung der Lichtwellenlänge (hier $0,51 \mu\text{m}$).

9.2.4.3 Die Stabilität des mechanischen Aufbaues

Zur näherungsweisen Betrachtung der Stabilität und Einstellgenauigkeit der Schärfe wird die Abbildung eines Kreisringes vom Durchmesser des genutzten Bilddurchmessers angenommen, wobei die optimale Schärfe eingestellt ist. Die äußere Kante ist für die Betrachtung durch Brenn- und Parallelstrahl gegeben. Wird die Projektionsebene um eine kleine Strecke Δs vom Objektiv weg bewegt, vergrößert sich der äußere Durchmesser $2\Delta r$ des Ringes unter Bildung einer unscharfen Zone (Zone, deren Helligkeit zwischen den definierten Werten "Hell" und "Dunkel" der Abbildung liegt). Die Durchmesserergrößerung des Ringes in Abhängigkeit von der Verschiebung der Projektionsebene wird durch die Neigung des Brennstrahles zur optischen Achse $\tan\beta$ bestimmt. Der durch Änderung der Schärfeneinstellung bedingte Meßfehler des optischen Analoggebers soll kleiner als 20 nm bzw. eine Verschiebung des Nullpunktes langsamer als 10 nm/s sein. Es ist nicht sinnvoll, die Projektionsebenenverschiebung auf eine Durchmesseränderung des betrachteten Ringes von 20 nm (d. i. 0,1 % des durchlaufenden Weges) zu beziehen, da gleichzeitig mit der Durchmesseränderung eine Kontraständerung vorhanden ist und außerdem die Geschwindigkeit der Fehlereinstellung die größere Rolle spielt. Deshalb wird eine maximal zulässige Durchmesseränderung des betrachteten Ringes von $0,51 \mu\text{m}$ (d. i. die maximale Auflösung des Objektives) in einem Zeitraum größer 51 s festgelegt. Damit ergibt sich die zulässige Verschiebung der Objektebene gegenüber dem Objektiv von

$$\Delta s = \frac{\Delta r}{\tan \beta} \quad (44)$$

$$\Delta s = \frac{0,51}{0,055} = 9,27 \text{ } \mu\text{m in } 51 \text{ s}$$

Das entspricht einer zulässigen Driftgeschwindigkeit von

$$v_s = 0,182 \text{ } \mu\text{m/s}$$

Diese Forderungen lassen sich mit einer Mikroskopmechanik mit waagerechtem Strahlengang erfüllen. Im Mustergerät wurden zwei Mikroskoptuben auf zwei Taumelscheiben auf einer stabilen Grundpatte montiert.

9.2.4.4 Die Ausleuchtung der Blendengitterebene

Für einen maximalen Bilddurchmesser von 19,8 mm errechnet sich der maximale Strahlenwinkel (größter Winkel eines Brennstrahles zur optischen Achse) mit einem Abstand der Bildebene von der Brennebene von 183 mm zu $3,15^\circ$. Für die Homogenität der Lichtstromverteilung über die Meßfläche wird nur die Strecke eines Strichabstandes betrachtet. Es ergibt sich in unmittelbarer Nähe der optischen Achse ein Bildwinkel von $0,4^\circ$. Die Fehler durch die inhomogene Verteilung des Lichtstromes über die Fensterfläche sind in der Kurve Abb. 19 mit enthalten.

Zur Dimensionierung der Streulichtblenden ist der freie Strahlendurchgang für den oben genannten maximalen Bilddurchmesser maßgebend. Dieser läßt sich aus dem Bilddurchmesser, dem Durchmesser der Austrittspupille des Objektives und dem Abstand des Objektivelementes, das die Austrittspupille bestimmt, von der Bildebene ermitteln. Man zeichnet die Grenzstrahlen von der Austrittspupille zur Bildebene in einer Skizze und kann die Durchmesser der Streulichtblenden in Abhängigkeit von ihrem Abstand zur Austrittspupille des Objektivs ablesen oder errechnen.

Aus der Abb. 22 läßt sich die Formel für den Öffnungswinkel β des Strahlenbündels ableiten.

$$\frac{(D-d)}{2L} = \tan \beta$$

Der Blendendurchmesser b einer Streulichtblende im Abstand h_s ergibt sich zu

$$b = d + \frac{(D-d)}{L} \cdot h_s$$

Hierbei sind:

- D der Bildfelddurchmesser = 19,8 mm
- d der Durchmesser der Austrittspupille des Spiegelobjektivs = 5,84 mm
- L der Abstand des Objektivaustrittsspiegels von der Bildebene = 181,9 mm

Für den Öffnungswinkel ergibt sich $\beta = 2,2^\circ$

Die Blendendurchmesser für zwei Streulichtblenden im Abstand $h_{s1} = 39,9$ mm und

$h_{s2} = 121,9$ mm vom Austrittsspiegel des Objektivs sind

$b_1 = 8,91$ mm und $b_2 = 15,2$ mm.

9.2.4.5 Die Herstellung von Feldblenden- und Fenstergitter

Zur Herstellung von Feldblenden- und Fenstergitter wird der fertig justierte Aufbau des optischen Weggebers benutzt. Das gravierte Abdeckgitter wird einmal in die Feldblendenebene und zum anderen Male in die Fensterebene auf Fotoplatten projiziert. Es wurden Versuche mit feinkörnigen Diaplaten (ORWO DU3) und hochauflösenden Fotoschichten (Tannin-Platten) gemacht. Die genannten Diaplaten reichen zur Herstellung der Gitter aus. Die gewonnenen Vergrößerungen des Abdeckgitters wurden zur fotolithografischen Herstellung von Metallgittern verwendet. Da die im fotolithografischen Verfahren benutzten

Kopierlacke UV-Licht hoher Intensität benötigen, mußte der Umweg über die fotografische Abbildung auf Diaplaten gewählt werden. Prinzipiell kann der optische Analoggeber auch mit den Diaplatenkopien als Blenden- und Fenstergitter betrieben werden. Durch den höheren Kontrast der Metallgitter wird aber ein wesentlich höherer Wirkungsgrad erzielt.

9.2.4.6 Der Fotodetektor

Wie schon in den vorangegangenen Kapiteln erwähnt, wurde als Fotodetektor ein zwölfstufiger Sekundärelektronenvervielfacher verwendet. Der SEV hat für den vorgesehenen Zweck eine genügend große lichtempfindliche Fläche, eine für die Mikrofotometrie erforderliche hohe Empfindlichkeit, eine hohe Bandbreite und eine im Verhältnis zu Halbleiterfotodetektoren gute Temperaturstabilität und Linearität der Kennlinie. Die beste Linearität der Kennlinien ist im Anodenstrombereich von etwa 0,1 bis 1 μA vorhanden. In diesem Bereich sind der Dunkelstrom von geringem Einfluß und die überlagerte Rauschspannung unter der Grenze des Zulässigen.

Bereits unter Punkt 9.2.3 wurde das mehr oder weniger stark ausgeprägte Einschwingen des SEV-Stromes bei einer sprungartigen Lichtstromänderung beschrieben. Es wurde deshalb die Type M12FS35 vom VEB Carl Zeiss Jena ausgewählt.

Die Daten dieses SEV sind folgende [143] ... [145] (Mittelwerte)

Katodenempfindlichkeit S_k 70 $\mu\text{A}/\text{lm}$

Verstärkung V_G 10^6

Stufenzahl n 12

maximal zulässiger Gleichstrom I_{Amax} 1 μA bzw. 500 μA bei Wechsellicht

Gesamtempfindlichkeit S_G 100 A/lm

Dunkelstrom I_D $2,1 \cdot 10^{-8} \mu\text{A}$

Impulsanstiegszeit τ_a 10 ns

Grenzfrequenz f_g 4,45 MHz bei $R_a = 50 \text{ k}\Omega$

Gleichmäßigkeit $\pm 10 \%$

Betriebsspannung U_B 1400 V

Stabilität besser 1 % bei U_B stabiler als $2 \cdot 10^{-5}$

mittleres Energieäquivalent der Rauschimpulse 7 keV bei $\Delta f = 10^6$ Hz

Die Homogenität des abgegebenen Signals hängt vorwiegend vom Rauschanteil des SEV-Stromes ab.

Das Signal-Rausch-Verhältnis des Regelsignals errechnet sich nach der Schottky-Formel für Sättigungskatodenströme und der Formel für das Widerstandsrauschen

$$i_{r1} = \sqrt{2 \cdot e \cdot J_{\Sigma} \cdot \Delta f} \quad \text{bzw.} \quad u_{r1} = R \sqrt{2 \cdot e \cdot J_{\Sigma} \cdot \Delta f} \quad (47)$$

$$i_{r2} = \sqrt{\frac{4kT}{R} \cdot \Delta f} \quad \text{bzw.} \quad u_{r2} = \sqrt{4k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f} \quad (48)$$

$$i_r = \sqrt{i_{r1}^2 + i_{r2}^2} \quad \text{bzw.} \quad u_r = \sqrt{u_{r1}^2 + u_{r2}^2} \quad (49)$$

Hierbei sind:

i_{r1} Rauschstromanteil am SEV-Strom

u_{r1} Rauschspannung an dem SEV-Arbeitswiderstand mit parallel geschaltetem Eingangswiderstand des Nachfolgeverstärkers

i_{r2} Strom infolge des thermischen Rauschens in den beiden vorstehend genannten Widerständen

u_{r2} thermische Rauschspannung an denselben Widerständen

R_s der resultierende Widerstand aus den beiden genannten

I_{Σ} SEV-Gleichstrom

e Elementarladung = $1,6 \cdot 10^{-19}$ As

Δf Bandbreite

k Boltzmannsche Konstante = $1,38 \cdot 10^{-23}$ Ws/grad

T absolute Temperatur (293 °K)

Aus den Gleichungen 45 oder 51 errechnet sich der Signal-Rausch-Abstand für einen maximalen Signalstrom von 1 μ A und für eine maximale Signalstromvariation von 66 %.

$$\frac{u_s}{u_r} = \frac{R_s \cdot J_e}{\sqrt{(R_s^2 \cdot 2 \cdot e \cdot J_e + 4kTR_s) \Delta f}} \quad (50)$$

$$\frac{u_s}{u_r} = \sqrt{\frac{[V_G \cdot S_K (\phi_s + \phi_N + \phi_D)]^2}{[2 \cdot e \cdot V_G \cdot S_K (\phi_s + \phi_N + \phi_D) + \frac{4kT}{R_A} (1 + \frac{R_A}{R_V})] \Delta f}} \quad (51)$$

Es bedeuten

- ϕ_s Lichtäquivalent des Signalstromes
- ϕ_N " " Streulichtstromes
- ϕ_D " " Dunkelstromes
- R_A SEV-Arbeitswiderstand
- R_V äquivalenter Rauschwiderstand (hier gleich Eingangswiderstand des Nachfolgeverstärkers)

$$\frac{u_s}{u_r} = \sqrt{\frac{10^{-12}}{(3,2 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-6} + 1,62 \cdot 10^{-20} \cdot 0,367 \cdot 10^{-5}) 2 \cdot 10^3}}$$

$$\frac{u_s}{u_r} = \sqrt{\frac{10^{10}}{7,59}} = 3,63 \cdot 10^4$$

Die vorstehenden Rauschspannungen und -ströme sind Effektivwerte, deren Größen wesentlich niedriger liegen als die Spitzenwerte der einzelnen Rauschimpulse. Die Höhe dieser Rauschimpulsspitzen läßt sich am besten aus den Erfahrungswerten der Gammaspektroskopieanwendung bestimmen. Das Einsetzen des Dunkelstromrauschens liegt dort für den verwendeten

SEV-Typ bei einem Strahlungsenergieäquivalent von ca. 7 keV.
Die Betriebsbedingungen sind dafür wie folgt festgelegt:

Bandbreite 10^6 Hz
Betriebsspannung ca. 1400 V
Anodenwiderstand 50 kOhm
Strahlungsäquivalent für 1 V Ausgangsspannung 661 keV

Danach würde 7 keV einer Spitzenspannung von ca. 10,6 mV entsprechen. Diese Rauschspannung wird von einem Dunkelstrom von $2,1 \cdot 10^{-8}$ A verursacht. Unter Verwendung der Gleichung 53 kann die zu erwartende Rauschspitzenspannung, die der Ausgangsspannung im Betrieb überlagert ist, annähernd bestimmt werden.

$$\frac{\hat{u}_{r1}}{\hat{u}_{r2}} = \sqrt{\frac{J_1 \cdot \Delta f_1}{J_2 \cdot \Delta f_2}} \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (53)$$

$$u_r = u_{r0} \sqrt{\frac{J_- \cdot \Delta f_2}{J_0 \cdot \Delta f_1}} \cdot \frac{R_5}{R_{A1}} \quad (54)$$

Es errechnet sich für einen maximalen Arbeitsstrom von 1 μ A eine Rauschspitzenspannung von

$$u_r = 10,6 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^3}{5 \cdot 10^{-8} \cdot 10^6}} = 3,26 \text{ mV}_{ss} \quad (55)$$

Das sind ca. 0,7 % der maximalen Ausgangsspannung des SEV. Durch die Exemplarstreuungen der verschiedenen Parameter der SEVs, die in die Rechnung eingehen, kann der Wert der überlagerten Rauschspitzenspannung in weiten Grenzen schwanken. Auch für die Gammaspektroskopie werden SEVs nach ihren Eigenschaften ausgesucht. Einzelne schmale Rauschimpulse haben durch die integrierenden Eigenschaften des thermohydraulischen Bewegungssystems nur eine geringe Wirkung. Aus den vorstehenden Betrachtungen leitet sich die Forderung ab, den SEV mit einer möglichst niedrigen Anodenspannung zu betreiben, weil dadurch der Reststrom absinkt, und den Anodenstrom des SEV so hoch wie möglich

einzustellen, weil dadurch der Rauschabstand größer wird. Dazu muß der Lichtstrom, der den SEV trifft, ausreichend groß sein. Für eine Stabilität der SEV-Vervielfachung von besser als 0,1 % muß die Konstanz der Spannung am SEV-Spannungsversorgungsgerät durch einen zusätzlichen Netzkonstanter von $2 \cdot 10^{-5}$ auf $2 \cdot 10^{-6}$ erhöht werden.

10. Die elektronische Steuereinheit

10.1 Die elektronische Erzeugung der Führungsfunktion

Bei der Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit wird die Geschwindigkeitsfunktion am besten durch eine Rechteckwellenspannung analog dargestellt. Die positiven und negativen Halbwellen entsprechen der positiven und negativen Relativgeschwindigkeit. Durch eine Integration kann die Weg-Zeit-Funktion, eine Dreieck- oder Sägezahnfunktion, erhalten werden. Mit einer weiteren Integration erhält man eine parabolische Funktion, die die Weg-Zeit-Funktion zum Betrieb mit konstanter Beschleunigung darstellt. Die einfachste Form der Erzeugung einer Rechteckspannung ist eine durch ein Integrationsglied verzögerte Selbstumschaltung eines polarisierten Relais (Abb. 23 a). Zur Stabilisierung der Anordnung können zwischen Relais und Integrationsglied (Abb. 23 b) ein Verstärker oder ein Schwellenschalter verwendet werden. Im Mössbauerspektrometer MS10 vom VEB Carl Zeiss Jena wird die Kombination eines Schwellenschalters (Schmitt-Trigger) und eines polarisierten Relais benutzt. Ein Integrationsglied mit einem Widerstand und einer Kapazität besitzt eine exponentielle Umladefunktion, deshalb wird immer nur ein kleiner Teil der Kurve, nämlich der steile Anfang zur Integration, benutzt. Dadurch entsteht eine sehr kleine Spannung, die verstärkt werden muß. Bei der Benutzung eines Verstärkers liegt es nahe, die integrierende Wirkung durch eine differenzierende Rückführung (ebenfalls mit einem RC-Glied zu erzeugen. (Abb. 23 c)

Für geringe Anforderungen an die Genauigkeit (bis etwa 1 %) können Schaltungen mit einem einzigen aktiven Bauelement

verwendet werden. (Bootstrapgenerator, Millerintegrator u.a.). Bei höherer Genauigkeit der Linearität und Amplitude müssen mehrstufige, stabilisierte Verstärker, sog. Operationsverstärker, verwendet werden. Ebenso lassen sich Stabilität und Genauigkeit von Schwellenschalter und Rechteckwellengenerator durch die Verwendung von Operationsverstärkern wesentlich steigern.

Zur Steigerung der Zuverlässigkeit und Signalqualität ist man bestrebt, mechanische Kontakte mit hoher Schalthäufigkeit, die den Signalstrom führen, zu vermeiden. In dem Schaltbild (Abb. 24) werden anstelle des polarisierten Relais Schaltdioden benutzt. Fast alle Funktionen werden von Operationsverstärkern ausgeführt. Das ist durch den Einsatz von integrierten Schaltkreisen bei einer Steigerung der Qualität wirtschaftlich. Leider standen zum entsprechenden Zeitpunkt keine integrierten Analogschaltkreise zur Verfügung. Der Aufbau von transistorisierten Operationsverstärkern erwies sich als zu teuer. Die erreichten Eigenschaften entsprachen nicht den Anforderungen. Deshalb mußten im Mustergerät Röhrenoperationsverstärker und Relais weitestgehend verwendet werden. (Abb. 26)

In der Schaltung Abb. 24 wird für den Betrieb mit konstanter Geschwindigkeit der Spannungspegel des Rechtecksignals durch einen Zähler mit drei Dekaden und einen Digital-Analogwandler erzeugt. Damit kann die Höhe der Rechteckspannung in eintausend präzisen Stufen variiert werden. Der Ausgangsspannungspegel des DA-Wandlers wird in einem Operationsverstärker mit Gegentaktausgang und niedrigem Ausgangswiderstand in zwei gleiche Spannungspegel mit entgegengesetztem Vorzeichen aufgespaltet. Am Ausgang des Operationsverstärkers 1 befindet sich der Diodenschalter, der durch den Schwellwertschalter, einen Operationsverstärker mit positiver Rückkopplung, gesteuert wird. Der Operationsverstärker 2 arbeitet als Integrator. An seinem Ausgang entsteht eine Dreiecksspannung, deren Höhe vom Schwellwertschalter bestimmt wird. Durch Umschalten der Schalter S_1 oder S_2 kann die Neigung der Vorder- oder Rückflanken der Dreiecke stark erhöht werden. Am Eingang des Operationsverstärkers 2 entsteht dann eine stark unsymme-

trische Rechteckspannung und an seinem Ausgang eine Sägezahnspannung. Gegenüber der hier geschilderten Amplitudensteuerung der Dreiecksspannung kann die Periodendauer auch von einer Quarzuhr gesteuert werden. In der Betriebsart "time mode" werden die Kanäle eines Vielkanalanalysators mit einer Quarzuhr geschaltet und die Schaltimpulse des mittleren und des letzten Kanals über einen bistabilen Multivibrator zur Steuerung des Schwellenschalters verwendet. Eine Synthese der Dreiecksspannung durch Aufsummieren von uniformen Quarzuhrimpulsen hat sich als unzweckmäßig erwiesen. Hauptsächlich ist hierbei die Forderung einer ursprünglichen Homogenität nicht erfüllt. Mit dem Operationsverstärker 4, der als Integrator arbeitet, wird die Dreiecksspannung in eine Parabelspannung umgewandelt. Die Signalausgänge I...IV werden über die Entkopplungswiderstände zusammengeschaltet. Diese Addition bietet die Möglichkeit, das Treibsignal entsprechend den Eigenschaften des Bewegungssystems vorzuentzerren und den Regelkreis davon zu entlasten.

In [149] und [150] wird eine hydraulische und pneumatische Erzeugung von Schwingungen niedriger Frequenzen beschrieben. Der notwendige Aufwand ist größer und die Genauigkeit der Zeitfunktion der Schwingung ist geringer als bei elektronischen Generatoren. [146] ... [151]

10.2 Der Leistungsverstärker zur Ansteuerung der Heizzelle

Mit Rücksicht auf die Lebensdauer und den Kennlinienverlauf der elektrolytischen Heizzelle wird diese hochohmig ausgelegt. Bei der hochohmigen Zelle kann man bei einem verhältnismäßig geringen Stofftransport eine entsprechend hohe Erwärmung erreichen. Deshalb sollten in der Endstufe Siliziumtransistoren mit Betriebsspannungen zwischen 150 und 350 V oder Röhren eingesetzt werden. Zur Linearisierung der Endstufe wird diese von einem Operationsverstärker angesteuert und die Gegenkopplung über beide hinweg vorgenommen. (Abb. 28)

10.3 Die Polwenderschaltung

Zur Verlängerung der Lebensdauer der Heizzelle wird die Stromrichtung vor jeder Bewegungsperiode umgeschaltet. Das kann durch ein Polwenderrelais mit Transistorlogik und -steuerverstärker erreicht werden. (Abb. 27)

In der Abb. 25 wird die Umschaltung am Leistungsverstärkereingang mit Schaltdioden durchgeführt.

10.4 Der Regelkreis

10.4.1 Prinzipielle Möglichkeiten der Regelung

Wie im Kapitel 3 beschrieben, wird die ideale Bewegungsfunktion in elektrisch analoger Form dargestellt. Ein elektromechanischer Wandler wird von dieser Funktion gesteuert und erzeugt die gewünschte Weg-Zeit-Funktion. Diese ist mit einem Fehler infolge nicht ideal linearer Kennlinie und durch das Einwirken äußerer Störgrößen auf die Bewegung behaftet. Die tatsächliche Weg-Zeit-Funktion wird durch einen Meßfühler in Verbindung mit einem mechanisch-elektrischen Wandler gemessen. Die Differenzspannung zwischen der idealen Führungsgröße und der Meßgröße wird als Regelsignal dem Bewegungsgeber zugeführt. Wenn der Bewegungsgeber nur von der Differenzspannung angetrieben wird, stellt die Anordnung einen reinen Folgeregler dar. Die günstigste Wirkung des Regelkreises wird dann erreicht, wenn das Steuersignal für den Bewegungsgeber z. B. durch Addition der ersten und zweiten Ableitung der Führungsfunktion nach der Zeit mit entsprechenden Amplituden zur Korrektur der dynamischen Eigenschaften des Bewegungssystems bzw. durch andere Maßnahmen zur Korrektur der Kennlinie vorentzerrt wird, so daß die notwendige Inanspruchnahme des Regelkreises ein Minimum wird. Das Regelsignal wird der steuernden Führungsfunktion beigemischt. Die Differenzbildung zwischen Führungsgröße und Meßgröße kann bei den analogen mechanischen, optischen oder elektrischen Größen durchgeführt werden. Als Beispiel sei die optische Differenzbildung zwischen zwei Blendenscheiben, der Blende mit der Normalbewegung

und der Meßblende, angeführt. In der vorliegenden Lösung, wo die Führungsgröße elektrisch vorhanden ist, bringt eine andere als die elektrische Differenzbildung keine Vorteile.

Bewegungsgeber und Meßwandler können proportionale, differenzierende und integrierende Wandlereigenschaften haben. Ein Bewegungsgeber nach dem Prinzip des dynamischen Lautsprechers arbeitet proportional. Das thermohydraulische Bewegungssystem ist ein Beispiel für einen Wandler mit integrierenden Eigenschaften. Bei den Meßwandlern unterscheidet man hauptsächlich Wegmesser (z.B. optisch-elektrischer Wegmesser), Geschwindigkeitsmesser (Prinzip der Induktionsspule - differenzierende Wirkung) und Beschleunigungsmesser (z. B. Prinzip eines Feder-Masse-Systems mit angeschlossenem Wegmesser). Je nach der Kombination der Eigenschaften von Bewegungsgeber und Meßwandler und je nach der Wahl der Ableitung der Führungsfunktion nach der Zeit zur Differenzbildung wird eine Integration, Differentiation oder Proportionalumwandlung der Führungsfunktion bzw. eine frequenzabhängige oder frequenzunabhängige Wirkung des Regelkreises erreicht.

Für den praktisch aufgebauten Regelkreis sind folgende Forderungen bzw. Voraussetzungen gegeben.

1. Der Bewegungsgeber hat ein integrierendes Verhalten.
2. Da der Wert der Geschwindigkeit einer Bewegung entlang einer vorgegebenen Strecke mit der Frequenz anwächst, müssen höhere Frequenzen in zunehmenden Maße ausgeregelt werden.
3. Die Lage der periodisch durchlaufenen Strecke (Nullpunkt) soll durch den Regelkreis mit fixiert werden.

Aus dem Punkt 1 leitet sich ab, daß zur Ansteuerung des Bewegungsgebers für eine z. B. dreieckförmige Weg-Zeit-Funktion eine rechteckförmige Spannungsfunktion erforderlich ist. Eingangsseitige nadelförmige Störimpulse wirken sich in der Bewegungsfunktion nur schwach aus.

Die erforderliche Dämpfung höherer Frequenzen (Punkt 2) kann durch eine differenzierende Rückführung (differenzierendes Verhalten des Meßwandlers) oder durch eine frequenzabhängige Dämpfung des Bewegungsgebers erreicht werden. Diese Aufgabe der Dämpfung höherfrequenter mechanischer Störungen von außen übernimmt der viskoelastische Federbalg. Eine stetig mit der Frequenz ansteigende Regelverstärkung führt leicht zur Instabilität des Regelkreises.

Der optische Analogwegmesser mit seinen proportionalen Übertragungseigenschaften berücksichtigt die Nullpunktfixierung. Das Ausgangssignal des Meßwandlers wird mit der integrierten Ansteuerfunktion (im oben angeführten Beispiel Dreiecksspannung) verglichen. Die Differenz wird der Ansteuerfunktion zugemischt. Der Regelkreis hat durch die integrierende Wirkung des Bewegungsgebers, kombiniert mit der proportionalen Übertragungseigenschaft des Meßwandlers, eine mit zunehmender Frequenz der Störgröße abnehmende Wirkung. Das garantiert eine hohe Regelkreiswirksamkeit auch bei sehr niedrigen Frequenzen und eine sehr gute Nullpunktstabilität.

10.4.2 Die Dimensionierung des Regelkreises

Der Regelkreis besteht im Prinzip aus einer integrierend wirkenden Regelstrecke und einem proportional wirkenden Regler. Eine solche Anordnung ist in [152] als prinzipiell stabil bezeichnet worden, wenn die Ordnung der Differentialgleichung der Regelstrecke und davon abhängig die Anzahl der Verzögerungsglieder des Reglers ein bestimmtes Limit nicht überschreiten. Hierbei wird die Kombination eines proportional wirkenden Reglers mit einer integral wirkenden Regelstrecke und die eines integral wirkenden Reglers mit einer proportional wirkenden Regelstrecke gleichgesetzt. Elemente, die stabilitätsmindernd wirken oder oszillatorischen Charakter haben, sind der äußere Wärmewiderstand des Heizgefäßes und die Masse der Balgflüssigkeit zusammen mit der der bewegten Strahlenquelle und des Strichgitters in Verbindung mit der Quer- und Längselastizität des

Federbalges. Der experimentelle Aufbau zeigte, daß der thermische Außenwiderstand nur eine Nichtlinearität verursacht und die viskoelastischen Eigenschaften des Federbalges Schwingungen weitestgehend dämpfen. Die Integrationszeitkonstanten des SEV und der Verstärker liegen außerhalb des betrachteten Bereiches, so daß die elektronischen Elemente als rein proportional wirkende Glieder angesehen werden können. Der betrachtete Frequenzbereich erstreckt sich von Null bis zu einem Maximalwert, der durch die maximale Heizleistung und den zurückzulegenden Weg bestimmt wird. Die obere Frequenzgrenze liegt bei der beschriebenen Dimensionierung bei ca. 5 Hz. Wie bereits unter 7.4.2 angeführt wurde, besitzt der thermohydraulische Wandler nichtlineare Eigenschaften, wie die quadratische Abhängigkeit des Weges von der angelegten Spannung, die Abhängigkeit der Wirkung des Außenwiderstandes von der Zeit und die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit des Elektrolyten von der Temperatur. Diese nichtlinearen Eigenschaften haben keinen nachteiligen Einfluß auf die Stabilität des Regelkreises. Sie stellen nur eine stärkere Belastung desselben dar.

Die Justierung des Regelkreises beginnt mit der optischen Einstellung der Wegmeßeinrichtung. Dabei wird der Regelkreis aufgetrennt und die Treibspannung abgeschaltet. Die Lichtquelle wird am Konstantgleichrichter so eingeregelt, daß bei maximalem Lichtdurchgang durch das Blendengittersystem im SEV ein Strom von $1 \mu\text{A}$ fließt, das bedeutet bei einem Außenwiderstand von $0,2 \text{ MOhm}$ eine maximale SEV-Ausgangsspannung von $0,2 \text{ V}$. Mit der Hochspannung des SEV besteht eine zweite Justiermöglichkeit des maximalen Ausgangsstromes. Diese SEV-Hochspannung wird so eingestellt, daß einmal der optimale Signal-Rauschabstand erreicht wird (ca. 1250 V) und daß zum anderen Mal nach Möglichkeit an der Glühlampe zur Erhöhung deren Lebensdauer 80% der Nennspannung anliegen. Die maximale Ausgangsspannung des Operationsverstärkers beträgt $\pm 50 \text{ V}$. Sie soll im Betrieb nicht überschritten werden. Demnach muß die Verstärkung des OP-Verstärkers auf ca. fünfhundertfach eingestellt werden. Der Nullpunkt wird so verschoben, daß das Ausgangssignal des Meßver-

stärkers symmetrisch zum Nullpotential liegt. Im Normalbetrieb werden nur 30 % der maximalen Aussteuerung ausgenutzt. Am zweiten Eingang des Differenzverstärkers wird das Vergleichssignal in der gleichen Höhe und mit der gleichen Phase angelegt. Das Treibsignal wird bei geöffnetem Regelkreis für etwa $\frac{2}{3}$ der vorgesehenen Maximalgeschwindigkeit optimal eingestellt. Auf eine Vorentzerrung des Treibsignals entsprechend der quadratischen Weg-Spannungskennlinie wurde verzichtet. Danach kann der Regelkreis geschlossen werden. Mit verminderter Genauigkeit arbeitet der Regelkreis auch ohne Anlegen des Treibsignals. Die Phasenlage des Regelkreises wird mit der Stellung des bewegten Blendengitters justiert. Bei Röhrenschaltungen muß das Heizgefäß während der Anheizzeit durch einen Widerstand ersetzt werden. Außerdem haben Operationsverstärker die Eigenschaft, nach einer Übersteuerung bis zur Entladung des Integrationskondensators im Chopperteil funktionsuntüchtig zu sein (das kann einige Minuten dauern). Dieser Effekt wird durch die Erhöhung der Zerhackerfrequenz von 50 Hz auf 20 kHz bei modernen Festkörper-OP-Verstärkern verringert. Eine Möglichkeit, Übersteuerungen zu vermeiden, besteht in der Anordnung von Zenerdioden im Gegenkopplungsweig, wobei die Linearität etwas geringer wird. Wenn die Operationsverstärker ausreichend übersteuerungssicher sind, kann die Verstärkung des Differenzverstärkers und des Leistungsverstärkers so weit erhöht werden, daß schon bei geringer Abweichung vom Sollwert die Korrektur mit der Maximalgeschwindigkeit erfolgt. Um eine ausreichende Korrekturmöglichkeit zu haben, muß die maximal mögliche Geschwindigkeit, die von der maximalen Kühl- und Heizleistung abhängt, entsprechend höher als die maximale Nenngeschwindigkeit sein. Die Wirkung des Regelkreises ist für sprunghafte Abweichungen vom Sollwert wegen der begrenzten Korrekturgeschwindigkeit in Frage gestellt. Die auszuregelnden Abweichungen sind proportional der Geschwindigkeit, verursacht durch die Nichtlinearität der Kennlinie. Die zeitabhängigen Abweichungen durch die Eigenschaften des thermischen Außenwiderstandes sind ausreichend langsam. R_a ändert sich mit $\tau_1 = 0,436$ s um 8,9 % und mit $\tau_2 = 122$ s um 56,8 % seines Wertes.

Die quadratische Geschwindigkeits-Spannungskennlinie wirkt sich für die Regelung günstig aus. Die Addition des differenzierten Treibsignals zur Treibspannung dient dazu, die Verzögerung des Regelkreises, die sich besonders an den Umkehrpunkten der periodischen Bewegung störend bemerkbar macht, zu kompensieren. Die im Folgenden angeführten Fehlerquellen sind unerheblich: die thermische Ausdehnung von Heizgefäß und Federbalg, die Kompressibilität der Heizflüssigkeit ($1,14 \cdot 10^{-4}$ pro Atmosphäre), der Einfluß des äußeren Luftdruckes und Schwingungen der Flüssigkeit im Federbalg. Der äußere Luftdruck reicht in jedem Falle aus, die bewegte Masse beim Zusammenziehen des Flüssigkeitsvolumens zu beschleunigen. Es treten keine Hohlräume im Balg auf, die nicht mit Flüssigkeit gefüllt sind. Durch Messung der Federkonstanten in Bewegungsrichtung am leeren Federbalg und derselben am flüssigkeitsgefüllten, fest verschlossenen könnte man das Verhältnis von Längs- und Querverexpansion statisch messen. Eine solche Messung ist aber meßzeitabhängig. Außerdem bleibt eine plastische Deformation zurück. Eine dynamische Messung mit dem beschriebenen elektrodynamischen Geschwindigkeitsgeber und -aufnehmer scheiterte an der mechanischen Instabilität der Anordnung im Verhältnis zur Kraft, die für die Deformation des Federbalges notwendig ist. Mit dieser Kombination konnten nur Schwingungen festgestellt werden, die in Form von Wellen, die in Bewegungsrichtung durch das Balgvolumen wandern und an den Endflächen reflektiert werden, auftreten. Der hydraulische Aufbau (vgl. 6.1) bestand hierzu aus zwei miteinander verbundenen Polyäthylenbälgen, die mit Silikonöl gefüllt waren und bei denen die Wandstärke im Verhältnis zu deren Durchmesser und zur Masse des Silikonöles gering war. Bei dem mit der beschriebenen Elektrolytlösung gefüllten PTFE-Federbalg wurde die Erscheinung nicht beobachtet.

Die verwendeten elektronischen Schaltungseinheiten wurden soweit wie möglich dem Aufbau des Mössbauerspektrometers MS10 des VEB Carl Zeiss Jena entnommen.

11. Meßmöglichkeiten der Qualität der erzeugten Bewegung

11.1 Die Konstanz der Geschwindigkeit über den Bewegungsbereich

Die Konstanz der Geschwindigkeit über die periodisch durchlaufene Strecke, d. h. die Linearität der Weg-Zeit-Funktion, läßt sich am besten durch eine digitale Weg-Zeit-Messung untersuchen.

Dazu kann

1. die Strecke durch Markierungen mit definiertem Abstand, wie z. B. optische Strichgitter oder Interferenzlinien, in eine ausreichend große Anzahl von Intervallen unterteilt werden und die Zeit zwischen den durchlaufenen Markierungen mit einer Quarzuhr gemessen werden
oder
2. die Anzahl der durchlaufenen Markierungen in vorgegebenen Zeitintervallen gemessen werden.

Dabei ist zu beachten, daß sich die Linearität der Weg-Zeit-Funktion in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ändern kann und bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten Hystereseeffekte zu erwarten sind.

Für die beschriebenen Messungen eignet sich ein Vielkanalspeicher bzw. ein Vielkanalanalysator zusammen mit einem quartzesteuerten Frequenznormal und einem umschaltbaren Frequenzteiler. Die Genauigkeit der Anordnung ist im wesentlichen von der Präzision der Wegmarkierungen und dem Frequenzverhältnis zwischen den Markierungen und der Quarzuhr abhängig. Für eine Auswertegenauigkeit von 0,1 % sollte die Anzahl der in einem Kanal gespeicherten Impulse mindestens tausend sein.

11.2 Die Messung der Breite des Momentangeschwindigkeitspektrums

Eine derartige Messung ist mit der vorstehend beschriebenen Anordnung nur bei bestimmten Voraussetzungen, wenn das Wesen der überlagerten Bewegungen bekannt ist, durchführbar. Das

trifft z. B. für den stick-slip-Effekt zu. Wenn in dem betrachteten Geschwindigkeitsbereich ein abwechselndes Haften und Gleiten zu erwarten ist und die Sprünge in der Gleitphase größer als das Auflösungsvermögen der Meßapparatur sind, läßt sich die Weite der Sprünge aus der Schwebung, die sich zwischen der Kanalweiterschaltfrequenz und der Sprungfrequenz ergibt, errechnen. Sie ergibt sich aus der maximalen periodischen Abweichung der pro Kanal gemessenen Strecke oder Laufzeit unter Berücksichtigung der Fehler der Apparatur. Oberhalb der Geschwindigkeit von ca. $0,5 \mu\text{m/s}$ kann ein elektrodynamischer Geschwindigkeitsgeber zur Feststellung des überlagerten Geschwindigkeitsspektrums bis zu einer oberen Grenzfrequenz benutzt werden. Höherfrequente Bewegungen, wie z. B. Ultraschallwellen, im Material lassen sich nicht direkt nachweisen, wenn man eine Nachweisempfindlichkeit von 10 nm/s fordert, so daß das Mössbauerspektrum die einzige Möglichkeit des Nachweises darstellt. Für die Linienqualität (Amplitude und Form) des Mössbauerspektrums ist aber nicht nur die Homogenität der Relativgeschwindigkeit von Quelle und Absorber, sondern auch deren Struktur (chemisch und physikalisch) (Lorentzform oder Gaußform der einzelnen Resonanzlinien) und die Temperatur, abgesehen von den Eigenschaften der Nachweisapparatur der Strahlung, maßgebend. Eine hochaufgelöste Mössbauerlinie beweist also eine gute Qualität der Bewegung. Eine schlecht aufgelöste Linie dagegen ist kein Kriterium für die Homogenität der Relativgeschwindigkeit. [153] ... [165]

11.3 Beurteilung der Homogenität der Bewegung beim vorliegenden thermohydraulischen Bewegungssystem

Überlagerte höhere Frequenzen werden durch die integrierenden Eigenschaften des thermohydraulischen Wandlers und die viskoelastischen Eigenschaften des Federbalges aus PTFE stark gedämpft. Die integrierenden Wandlereigenschaften werden besonders für überlagerte Impulse und für das Rauschen auf der Treibspannung und die Federbalgeigenschaften für überlagerte

Störgeschwindigkeiten sowohl vom Heizgefäß als auch mechanisch von außen wirksam.

In der Arbeit Großer Beleg 4C-89/67 (siehe 5.2.3) wurde eine Anordnung eines thermohydraulischen Ausdehnungssystems mit einem Michelson-Interferometer untersucht:

Wie bereits angeführt, betrug die Genauigkeit der Untersuchung $\pm 0,272 \text{ } \mu\text{m}$ pro 15 s d. h. $\pm 18,2 \text{ nm/s}$. Da keine kleineren Wege abgelesen werden konnten, ist im Bereich 20 nm/s bis 500 nm/s keine Aussage über das Geschwindigkeitsspektrum möglich. Es ist aber unwahrscheinlich, daß in diesem schmalen Bereich gerade Geschwindigkeitskomponenten vorhanden sind. Aufschluß über das Vorhandensein von Geschwindigkeitskomponenten im genannten Bereich kann eine Serie von Mössbauerspektren geben.

12. Zusammenfassung

Ausgehend von den Anforderungen, die die Mössbauerspektrometrie mit den Isotopen Zn^{67} und Ta^{181} an die Technik des wissenschaftlichen Gerätebaues stellt, wurde durch eine Diskussion der Prinzipien bekannter Mössbauerspektrometer einerseits und der theoretischen Möglichkeiten andererseits die Anordnung des thermohydraulischen Bewegungsgebers entwickelt. Zur Erzeugung von periodischen Bewegungen mit definierten Geschwindigkeiten oder Geschwindigkeitsänderungen zwischen 20 nm/s und 0,1 mm/s wird eine Flüssigkeit durch Durchfluß von elektrischem Strom durch dieselbe praktisch verzögerungsfrei aufgeheizt. Der elektrochemische Prozeß ist reversibel. Die Wärmeausdehnung der Flüssigkeit wird durch einen Federbalg aus viskoelastischem Material (PTFE) in eine Bewegung mit sehr schmalen Momentangeschwindigkeitsspektrum umgesetzt. Über die Elektrodenbleche erfolgt eine konstante Kühlung der Heizzelle. Die erzeugte Bewegung wird über einen ~~elektrooptischen~~* analog arbeitenden Wegmesser kontrolliert, wobei gleichzeitig der prinzipiell nicht-lineare Verlauf der Kennlinie des Bewegungsgebers korrigiert wird. Es besteht eine multivalente Nutzbarkeit der Anordnung für verschiedene Formen der Feinbewegung und Positionierung.

*optisch-elektronischen

Die folgenden Patentanmeldungen zur vorliegenden Thematik wurden vom Verfasser an die Patentabteilung des VEB Carl Zeiss Jena eingereicht:

1. Einrichtung zur Erzeugung kleiner homogener Geschwindigkeiten
eingereicht am 4. 12. 67 unter der Nr. 81/67
angemeldet am 8. 8. 68 unter der Nr. 42 h/134015
2. Analog arbeitender optisch-elektrischer Wandler für kleine Wege
eingereicht am 27. 1. 69 unter der Nr. 7/69
z. Z. noch nicht zur Anmeldung bearbeitet
3. Anwendungs- und Ausführungsformen des optisch-elektronisch kontrollierten Bewegungssystems
eingereicht am 23. 6. 69 unter der Nr. 49/69
z. Z. noch nicht zur Anmeldung bearbeitet
4. Schaltung für hochlineare Amplitudenmodulation
(Zur Modulation des Wertes der Momentangeschwindigkeit auf die zugehörigen Szintillationsimpulse)
eingereicht am 1. 12. 64 unter der Nr. 98/64

Anlage I

Elektronischer Impulsformeraufbau zur Anpassung eines elektronisch-optischen Wandlers an eine Zähleinrichtung zur Zählung von Interferenz- oder Strichgitterlinien

Die Abbildung Anl. 2 zeigt das Blockschaltbild der Meßeinrichtung. Der optische Aufbau unterscheidet sich nicht von dem des beschriebenen elektronisch-optischen Analogwegmessers, bis auf die Tatsache, daß die Bewegungsweite wesentlich größer ist als ein Strichabstand.

Der Arbeitswiderstand des Fotodetektors (Sekundärelektronenvervielfacher) wird (Abb.: Anl. 1) zur Dunkel- bzw. Restlichtkompensation an einen niederohmigen variablen Spannungsteiler gelegt. Gleichzeitig wird an diesem Regler die Lage der Spannungsvariation an der SEV-Anode relativ zu den beiden Schaltschwellen des Schmitt-Triggers (Hysterese) so eingestellt, daß bei minimalen Helligkeitsschwankungen ein sicheres Ein- und Ausschalten erreicht wird. Die Höhe der Vorverstärkung wird durch die vorhandene Rauschspannung begrenzt. Sie darf die Spannungsdifferenz zwischen beiden Schaltschwellen nicht überschreiten. Die zeitliche Genauigkeit des Schaltpunktes wird durch den Rauschabstand bestimmt. Je größer die Steilheit der Schaltflanke ist, desto weniger wirken sich Rauschimpulse auf den Schaltzeitpunkt aus. Am Punkt M kann die Arbeitspunktjustierung und die Funktion der Schaltstufe durch einen Oszillografen kontrolliert werden. In der beschriebenen Schaltung beträgt der Abstand der Schaltschwellen ca. 1 V (zwischen 2 und 3 V gegen Masse). An P 2 kann die Vorverstärkung variiert werden. Über ein Differenzierglied und einen polaritätsselektiven Verstärker (Negator) werden die für die Zähleinrichtung erforderlichen Nadelimpulse erzeugt. Mit T 6 wird eine Impedanzwandlung zur Anpassung an ein abgeschirmtes Kabel durchgeführt.

Für die Anordnung eignen sich nur mit Gleichspannung betriebene Spektrallampen, die ein geringes Rauschen (besonders Funkelrauschen oder Oszillationseffekte) zeigen.

Es wurde versucht, die Genauigkeit der Anordnung durch eine Impulsverdopplung unter Ausnutzung der Schaltvorgänge in beiden Richtungen zu erhöhen. Es zeigte sich, daß hierfür die Arbeitspunktstabilität und die Einstellbarkeit der Symmetrie im Verhältnis zur Genauigkeit der digitalen Zähleinrichtung nicht ausreichten.

14. Literaturverzeichnis

1. Mössbauer, R. L.,
Kernresonanzabsorption von Gammastrahlung
in Ir 191
Naturforschung 14 a (1959) S. 211...216
2. Mössbauer, R. L.,
Kernresonanz von Gammastrahlung
Z. Physik 151, (1958) S. 124 in Ir 191
3. Mössbauer, R. L.,
Kernresonanz von Gammastrahlung
Naturwiss. 45, (1958) S. 539
4. Mössbauer, R. L.,
Rückstoßfreie Kernresonanzabsorption von Gammastrahlung
Physikalische Blätter 18 (1962) 3 S. 97...111
5. Kagan, J.,
Effekt Messbauera
Verlag Internationale Literatur, Moskau 1962
6. Goldanski
Der Mössbauereffekt und seine Anwendung
Akademieverslag UdSSR
7. Petzold, J.,
Die Theorie des Mössbauereffektes
Sitzungsberichte der Heidelberger Akademie der
Wissenschaften, Springerverlag (1960/61) 5 S. 113...155
8. Frauenfelder, H.,
Der Mössbauereffekt
Verlag W. A. Benjamin New York 1962
9. Nachtigall, D.,
Der Mössbauereffekt
Röntgenblätter (1963) S. 389
10. Wertheim, G. K.,
Mössbauer Effect Principles and Applications
Verlag Academic Press New York/London 1964

11. Wegener, H.,
Der Mössbauereffekt und seine Anwendung in Physik und Chemie
Bibliographisches Institut Mannheim
Hochschultaschenbücherverlag 1965
12. Craig, P. P.; Nagle, D. E., and Cochran, D. R. F.,
Zeeman Effect in the Recoilless Gamma Ray
Resonance of Zn 67
Phys. Rev. Letters 4 (1960) 11 S. 561
13. Nagle, D. E.; Craig, P. P., and Keller, W. E.,
Ultra High Resolution Gamma Ray Resonance in Zn 67
Nature 186 (1960) S. 707
14. Pound R. V.; Rebka, G. A.,
Attempts to Detect Resonance scattering in Zn 67
the Effect of Zero-Point Vibrations
Phys. Rev. Letters 4 (1960) S. 397
15. Aksenov, S. J.; Afimenkov, V. P.; Lushchikov, V. J.,
Ostanevich, Yu. M.; Shapiro, F. L.; Yen, W. K.,
Observation of Resonance Absorption of Gamma Rays in Zn 67
Zh Eksperim. i teor. Fiz. 40 (1961) S. 88
Soviet Phys-Jetp 13 (1961) S. 62
16. Alfimenkov, V. P.; Ostanevich, Yu. M.; Ruskov, T.,
Strelkov, A. V.; Shapiro, F. L.; Yen. W. K.,
Energy Spectrum of Resonance Absorption in Zinc
Oxide of the 92 keV Gamma Radiation from Zn 67
Zh. Eksperim. i teor. Fiz. 62 (1962) S. 1029
Soviet Phys-Jetp 15 (1962) S. 713
17. Cohen R. L.; Marinov, A.; Budnick, J. I.,
Mössbauer Effect in Ta 181
Phys. Letters 12 (1964) S. 38...40
18. Muir, A. H. Jr.,
The 6 keV Transition in Ta 181
Nucl. Phys. 68 (1965) S. 305...314

19. Steyert, W. A.; Taylor, R. D.; Storms, E. K.,
Mössbauer Hyperfine Spectra of Ta 181 in Ta and W Metals
Phys. Rev. Letters 14 (1965) 18 S. 739
20. Muir, A. H.; Nadler, H.,
Mössbauer Effect with 6,25 keV Gamma Rays in Ta 181
Bull. Am. Phys. Soc. 12 (1967) 2 S. 202
21. Sauer, C.; Matthias, E.; Mössbauer, R. L.
Recoilless Resonance Absorption and Hyperfine
Structure of the 6,2 keV state in Ta 181
Phys. Rev. Letters 21 (1968) 14 S. 961...64
22. Czibok, T.; Dezci, I.; Keszthelyi, L.,
Mössbauereffekt in Tb 159
Acta Phys. Acad. Sci. Hung. 20 (1966) 4 S. 379...381
23. Gruverman, I. J.;
Mössbauer Effect Methodology
Band I und II
Verlag Plenum Press New York 1965
24. The Mössbauer Effect
Proc. of the 2nd Int. Conf. on the Mössbauer Effect
Verlag John Wiley and Sons Inc. New York 1962
25. Grodzins, L.; Phillips, E. A.,
Measurement of the Refractive Index of Lucite
by Recoilless Resonance Absorption
Phys. Rev. 124 (1961) 3 S. 774...776
26. Ruby, S. L.; Bolef, D. I.,
Acoustically Modulated Gamma Rays from Fe 57
Phys. Rev. Letters 5 (1960) 1 S. 5...7
27. Bolef, D. I.; Mishory, J.,
Moessbauer Spectra by Means of a Variable
Frequency Ultrasonic Spectrometer
Appl. Phys. Letters 11 (1967) 10 S. 321...323

28. Kappler, H. M.; Trautwein, A.; Mayer, A.; Vogel, H.,
Mechanical Constant Velocity Drive for Mössbauer-
Spectroscopy of Hemoglobin
Nuclear Instr. Meth. 53 (1967) S. 157...162
29. De Pasquali, G.; Frauenfelder, H.; Margulies, S.,
Peacock, R. N.,
Nuclear Resonance Absorption and Nuclear Zeeman
Effect in Fe 57
Phys. Rev. Letters 4 (1960) 2 S. 71...73
30. Adler, A. D.; Hane, M.,
A Simple Mössbauer-Effect Apparatus
Am. J. Phys. 34 (1966) 3 S. 189
31. Knauer, R. C.; Mullen, J. G.,
New Automation Technique for Constant
Velocity Mössbauer Spectrometers
Rev. Sci. Instr. 38 (1967) 11 S. 1624...1628
32. Shirley
Recoil-free Resonant Absorption in Au 197
Phys. Rev. 123 (1961) S. 816
33. Zemcik, T.
Mössbauer-Spektrometer mit Nockengetriebe
und Ermittlung von Geschwindigkeitsspektren
Phys. Verh. 17 (1966) 5/6 S. 175
34. Mössbauer, R. L.; Wiedemann, W. H.,
Kernresonanz nichtdopplerverbreiteter
Gammastrahlung in Re 187
Z. Physik 159 (1960) S. 33
35. Kankaleit, E.,
Simple Mössbauer Spectrometer Using X-Ray
Film
Am. J. Phys. 34 (1966) 9-1 S. 778...779
36. Nussbaum, R. H.; Gerstenfeld, F.; Richardson, K.,
Precision High-Resolution Mössbauer Spectrometer
Am. J. Phys. 34 (1966) 1 S. 45

37. Margulies, S.,
The Mössbauer Effect in Iron 57
Diss. Abs. 23 (1962) 2 S. 663
38. Cassell, K.; Jiggins A. H.,
A linear Velocity Drive for A Mössbauer
Spectrometer
J. sci. Instrum. 44 (1967) 3 S. 212...213
39. Pound, R. V.; Rebka, G. A.,
Apparent Weight of Photons
Phys. Rev. Letters 4 (1960) 7 S. 337...341
40. Gerson, R.; Denno, W. S.,
Mössbauer Spectrometer Using a Piezoelectric
bar in Resonant Oscillation
Rev. Sci. Instr. 36 (1965) 9 S. 1344...1346
41. Kundig, W.,
Measurement of the Transverse Doppler Effect in
an Accelerated System
Phys. Rev. 129 (1963) S. 2371
42. Berlincourt, D.,
Transducer Using the Electric Field-Forced
Antiferroelectric-Ferroelectric Transition
Ultrasonics 6 (1968) 1 S. 48-51
IEE Transactions on Sonics and Ultrasonics
SU - 13 (1966) 4 S. 116
43. Hesse, G.,
Ein elektrostriktiv geregeltes Fabry-Perot-Interferometer
Feingerätetechnik 14 (1965) 12 S. 535
44. Hesse, G.; Dietel, W.,
Piezoelektrisch justier- und abstimmbare
Fabry-Perot-Resonatoren
Experim. Techn. d. Physik 14 (1966) 5 S. 174

45. Bornaz, M.; Filotti, G.; Gelberg, A.; Gragari, V.,
Nistor, C.,
A Mössbauer Spectrometer
Nucl. Instr. Meth. 40 (1966) S. 61...66
46. Flinn, P. A.,
Velocity Servo Drive for a High Precision
Mössbauer-System
Rev. Sci. Instr. 34 (1963) 12 S. 1423
47. Baumgartner, J.,
Argonne National Laboratory Report ANL 6169
48. Kerler, W.; Neuwirth, W.,
Messung des Mössbauereffekts von Fe 57 in zahlreichen
Eisenverbindungen bei verschiedenen Temperaturen
Z. Physik 167 (1962) S. 176...193
49. Ouseph, P. J.; Wahedd, A.,
Simple Electromechanical Drive for Mössbauer Experiments
Am. J. Phys. 34 (1966) 10 S. 990
50. Cohen, R. L.; Mc Mullin, P. G.; Wertheim, G. K.,
High Velocity Drive for Mössbauer Experiments
Rev. Sci. Instr. 34 (1963) S. 671...673
51. Cohen, R. L.,
Improvements on Electromagnetiv Velocity
Drive for Mössbauer Experiments
Rev. Sci. Instr. 37 (1966) 7 S. 957...959
52. Lövborg, L.,
Velocity Drive for Mössbauer Experiments
Using an Amplifier with Negativ Output Impedance
Nucl. Instr. Meth. 34 (1965) 3 S. 307...310
53. Lipkin, J.; Schechter, B.; Shtrikeman, S.; Treves, D.,
Inexpensive Automatic Recording Mössbauer Spectrometer
Rev. Sci. Instr. 35 (1964) 10
54. Ruegg, F. C.; Spijkermann, J. I.; De Voe, J. R.,
Drift-Free Mössbauer-Spectrometer
Rev. Sci. Instr. 36 (1965) 3 S. 356

55. Kankleit, E.,
Velocity Spectrometer for Mössbauer Experiments
Rev. sci. Instr. 35 (1964) 2 S. 194...197
56. Clark, P. E.; Nichol, A. W.; Carlow, J. S.,
A Precision Velocity Generator Suitable
for Mössbauer Experiments
J. sci. Instr. 44 (1967) 12 S. 1001...1004
57. Sawicki, A.; Wielanier, A.,
Przybliżone obliczenie ugięcia membrany labiryntowej
Pomiary Automatyka Kontrola XIV (1968) 7 S. 325...327
58. Kocher, C. W.,
Hydraulic Constant-Velocity Transducer of Mössbauer
Effect Measurements
Rev. sci. Instr. 36 (1965) 7 S. 1018...1022
59. Schabel, P.; Uljalki, E.,
Untersuchung des Mössbauerspektrums der K-Konversions-
linie von Fe 57 mit Hilfe eines hydraulischen Mössbauer-
spektrometers
Acta physica austria 21 (1966) 1/2 S. 154...162
60. Bowden, F. P.; Leben, L.,
Die Natur des Gleitens und die Analyse der Reibung
Proceedings of the Royal Society of London
Band 169 (1939) S. 371...391
61. Beuerlein, P.,
Ein Beitrag zur Klärung des Stick-Slip--Vorganges
7. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 1954
"Fortschrittliche Fertigung und moderne Werkzeugmaschinen"
Verlag W. Girardet Essen
62. Häußler, F. W.; Wanke, A.,
Zur Berechnung des Stick-Slip-Vorganges
Maschinenbautechnik (1959) S. 45
63. Fleischer, G.,
Grundsätzliches über das Stick-Slip-Phänomen
Freiberger Forschungshefte A 164 (1960) 7 S. 72

55. Kankaleit, E.,
Velocity Spectrometer for Mössbauer Experiments
Rev. sci. Instr. 35 (1964) 2 S. 194...197
56. Clark, P. E.; Nichol, A. W.; Carlow, J. S.,
A Precision Velocity Generator Suitable
for Mössbauer Experiments
J. sci. Instr. 44 (1967) 12 S. 1001...1004
57. Sawicki, A.; Wielanier, A.,
Przybliżone obliczenie ugięcia membrany labiryntowej
Pomiary Automatyka Kontrola XIV (1968) 7 S. 325...327
58. Kocher, C. W.,
Hydraulic Constant-Velocity Transducer of Mössbauer
Effect Measurements
Rev. sci. Instr. 36 (1965) 7 S. 1018...1022
59. Schabel, P.; Uljalki, E.,
Untersuchung des Mössbauerspektrums der K-Konversions-
linie von Fe 57 mit Hilfe eines hydraulischen Mössbauer-
spektrometers
Acta physica austria 21 (1966) 1/2 S. 154...162
60. Bowden, F. P.; Leben, L.,
Die Natur des Gleitens und die Analyse der Reibung
Proceedings of the Royal Society of London
Band 169 (1939) S. 371...391
61. Beuerlein, P.,
Ein Beitrag zur Klärung des Stick-Slip--Vorganges
7. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 1954
"Fortschrittliche Fertigung und moderne Werkzeugmaschinen"
Verlag W. Girardet Essen
62. Häußler, F. W.; Wanke, A.,
Zur Berechnung des Stick-Slip-Vorganges
Maschinenbautechnik (1959) S. 45
63. Fleischer, G.,
Grundsätzliches über das Stick-Slip-Phänomen
Freiberger Forschungshefte A 164 (1960) 7 S. 72

73. Vigoureux, P.; Booth, C. F.,
Quartz Vibrators and their Applications
London His Majesty's Stationary Office 1950
74. Rint, C.,
Handbuch für Hochfrequenz- und Elektro-Techniker Band II
Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik GMBH
75. Scheel, S.; Ebert
Fernthermometer
Leipzig 1925
76. Wüst, W.,
Die Berechnung von Bourdonfedern
VDI Forschungsheft 489
77. Wüst, W.,
Der Einfluß der Querschnittsform auf das Verhalten
der Bourdonfeder
Ing. Arch 20 (1952) 2
78. N. N.
Fused Quartz Precision Pressure Gages
Controllers System
Texas Instruments Bulletin S-141 A
79. N. N.
Manometer mit Balgenfeder in einer Blattfeder
GIT Fachzeitschrift für das Labor 2 (1965) S. 720
80. Osipovic, L. A.,
Miniatjurnye svarnye sil' fony
Pribory i sistemy upravlenija (1967) 11 S. 51
81. Rosales, L. A.; Fitton, I. A.,
Multiple Orific Throttle Valve
Design News 24 (1969) 12 S. 53
82. N. N.
Konstruktionsangaben für "Teflon", TFE und FEP Harze
Du Pont - Firmenschrift
Sowie Firmenschriften der Firmen Merkel (Hamburg) und
Lanza (Italien) über PTFE-Federbälge

83. N. N.
Die Beschaffenheit von "Fluon" PTFE
Imperial Chemical Industries Limited
Firmenschrift
84. Aurin, S.,
Plastbelag an Führungsbahnen von Werkzeugmaschinen
Der Maschinenbau 2 (1960) 4 S. 106...109
85. Stock, A. J.,
PTFE Dry Film Lubricants for the Reduction of Friction
and Wear
Engineers' Digest 26 (1965) 4 S. 85...86
86. Vogel, K.,
Untersuchung des Spannungsrelaxationsverhaltens von
hochpolymeren Kunststoffen bei verschiedenen einfachen
Beanspruchungsarten
Dissertation TH Braunschweig 1966
87. Vogel, K.,
Mechanisch-elektrische Wandler für die Messung der
viskoelastischen Kennwerte von hochpolymeren Kunststoffen
PTB-Mitteilungen 77 (1967) 4 S. 301
88. Hall, J. L.,
High Frequency Titration
Analytical Chemistry 24 (1952) 8 S. 1236...1240
89. Blaedel, W. J.; Malmstadt, H. V.; Petitjean, D. L.;
Anderson, W. K.
Theory of Chemical Analysis by High-Frequency Methods
Analytical Chemistry 24 (1952) 8 S. 1240...1241
90. Reilley, C. N.; Mc Curdy, W. H. Jr.,
Prinziples of High Frequency Titrimetry
Analytical Chemistry 25 (1953) 1 S. 86...93
91. Cruse, K.; Huber, R.
Hochfrequenztitration
Monographie zur "Angewandte Chemie" und "Chemie-Ingenieur-
Technik" Nr. 63
Verlag Chemie GmbH Weinheim/Bergstr. 1957

92. Püschner, H.,
Wärme durch Mikrowellen
Grundlagen, Bauelemente, Schaltungstechnik
Philips, Eindhoven 1964
93. Kretzer, K.,
Handbuch für Hochfrequenz- und Elektrotechniker
Band VI S. 447 ff
Verlag Radio-Foto-Kino-Technik GmbH Berlin 1960
94. Lomanowitsch, W. A.; Strisheweski, I. W.,
Elektrochemische Wandler
(Chimotronye Pribory)
Verlag Energija Moskau 1968
95. Krjukowa, Sinjakowa, Arefjewa
Polarographische Analyse
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
Leipzig 1964
96. Fisch, M. L.,
Chemotronische Bauelemente in der Automatisierung
Verlag Technika Kiew 1967
97. N. N.
E-Cell (TM) Timing and Integrating Components
Bulletin 103 A Supersedes Bulletin 103
Bissett Berman; A subsidiary of Alloys Unlimited, Inc.
98. D'Ans, J.; Lax, E.,
Taschenbuch für Chemiker und Physiker
Springer-Verlag Berlin Göttingen Heidelberg 1949
99. Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie
Verlag Chemie GmbH Weinheim/Bergstr. 1960
100. Perelmann, W. I.,
Taschenbuch für Chemie
VEB Deutscher Verlag der Wissenschaft
2. Auflage 1959

101. Fejans; Schwartz, E.,
Handbuch der Experimentalphysik
(Elektrochemie) Bd. 12 Teil I und II
Akademische Verlagsgesellschaft mbH
Leipzig 1932/33
102. Brdicka
Grundlagen der physikalischen Chemie
Berlin 1967
103. Falkenhagen
Theorie der Elektrolyte
Hirzel-Verlag Leipzig 1932
104. Kortüm, G.,
Lehrbuch der Elektrochemie
Verlag Chemie Weinheim/Bergstr. 1957/1966
105. Kortüm, G.,
Elektrolytlösungen
Leipzig 1941
106. Robinson, R.; Stokes, R.,
Lösungen von Elektrolyten
Verlag IL Moskau 1963
107. Vogel; Janietz,
Untersuchung einer elektrolytischen Zelle für eine
reversible gasfreie Elektrolyse auf ihre elektrischen
Eigenschaften
Praktikumsarbeit im VEB Carl Zeiss Jena, FEEf5, 4. 10. 68
108. Retschke, B.,
Optische Erscheinungen beim Kopieren hochauflösender
Konturen
Dipl.-Arbeit CZ/Phys. Inst. FSU Jena 1968
109. Erler, W.; Eggert, H.,
Eichung von Schwingungsaufnehmern nach dem Rezipro-
zitätsverfahren
Feingerätetechnik 17 (1968) 1 S. 31...38

110. Bunbury, D. St. P.,
The Disign of Apparatur for the measurement of
Mössbauer Spectra
J. sci. Instr. 43 (1966) S. 783
111. Forester, D. W.; Moore, B. K.; Obenshain, F. E.,
A Transducer Giving Equal Times at Each Velocity
Rev. Mod. Phys. 36 (1964) S. 361
112. Budnick, G.,
Das Messen von Geschwindigkeiten an Werkzeugmaschinen
VDI Forschungsheft 470
113. Ristow, J.,
Der Frequenzgang elektrodynamischer Geschwindigkeitsgeber
Maschinenbautechnik 10 (1961) 11 S. 579
114. Fritz, R.; Schulze, D.,
Neues Verfahren zur Geschwindigkeitseichung von
Mössbauerspektren
Nucl. Instr. Meth. 62 (1968) 3 S. 317...320
115. de Waard, H.,
Optical Method for Absolute Velocity
Calibration of Mössbauerspectrometers
Rev. sci. Instr. 36 (1965) 12 S. 1728...1733
116. Spijkerman, J. J.; Ruegg, F. C.; De Voe, J. R.,
Digital-Controlled Constant Acceleration in
Applications of the Mössbauer-Effect in Chemistry
and Solid-State Physics
(Seite 53...57) Intern. Atomic Energy Agency
Vienna 1966
117. Holbein, G.,
(Weggebersysteme)
Feinwerktechnik (1959) 11 S. 394
118. Versari, W. R.,
Induktive Meßwandler
Automatik (1962) Aug. S. 303

119. Frisch, H.,
Die numerische Steuerung von Werkzeugmaschinen
Elektronik (1965) 11
120. Vafiadakis, A. P.,
Two Moiré Instruments
J. sci. Instr. 44 (1967) 12 S. 1008...1010
121. N. N.
Induktive Weggeber
Industriekurier Technik und Forschung 21 (1968) 56 S. 205
122. Knappe, H.,
Fotoelektronische Meßwertgeber
Ind. Elektr. Elektron., Elektrowelt 13 (1968) 9 S.199...202
123. Osipovic, L. A.; Schif, M. U., u. a.
Differenzial'nyj poluprovodnikovyyj dacik davlenija
Pribory i sistemy upravlenija (1969) 3 S. 46...47
124. N. N.
Foto-Diskriminator mißt geringe mechanische Bewegungen
Elektronik 15 (1966) 3 S. 90
125. Rost, R.,
Das laterale Fotoelement
Elektronik 16 (1967) 4 S. 105
126. Kotenko, T. I.; Pogodin, V. I.; Zejtlin, Ja. M.,
Gal'vanomagnitnyj mikrometr
pribory i systemy upravlenija (1967) 7
127. Bojarov, A. I.; Klejmenov Ju. V.; Hovizkij, E. A.,
Ovcarenko, G. I.,
Induktivnyj profilograf-profilometr
"kalibr-VEI"
Stanki i Instrument 26 (1955) 12 S. 21
128. Thiele, K.,
Induktiver Positionsgeber
Elektronik 17 (1968) 1 S. 5...6

129. Nikolajev, G. V.; Schapiro, E. G.,
Malogabaritnye elektriceskie daciki davlenija
Pribori i Systemi Upravlenija (1967) 8 S. 50...51
130. Groll, H.,
Mikrowellenmeßtechnik
VEB Verlag Technik 1969
131. Stuchly, S. S.; Kraszewski, A.; Unipan
Mikrowellenmethoden und -geräte zur Messung und
Regelung kontinuierlicher industrieller Prozesse
Nachrichtentechnik 18 (1968) 2 S. 13
132. Pflieger, P.,
Elektrische Messung mechanischer Größen
Berlin 1948
133. Benda, E. B.,
Die Anwendung lichtelektrischer Einrichtungen
in der Fertigung
Siemens-Z. 19 (1939) S. 283...287
134. Quevroux
Emploi des flux de lumière dans les mesures
Rev. gén. Electr. 44 (1938) S. 265...268
135. Wächtler
Optische Meßsonde für Bewegungsaufnahmen an
schnellen Mechanismen
Atompraxis 14 (1968) 11/12 S. 509
136. N. N.
Elektro-optischer Wegmesser Type 100
Firmenschrift emneg Meßtechnik
TIFO Juni 68 W. Nr. 371790 (158)
137. Bowie; Taylor
Ein System zur Erdidentifizierung
Mining Mag 99 (1958) S. 265...277; 337...345

138. Uytembogaardt; Bowie
Geologische Tagung 14. 12. 1964
Econ Geol 60 (1965) S. 1326...1329
139. Leow, J. H.,
Reflexionsmessungen an Molybdänglanz
Econ Geol 61 (1966) S. 598...612
140. Piller, H.,
Der Einfluß der Lichtreflexion auf die Objektive bei
quantitativen Reflexionsmessungen mit dem Mikroskop
Mining Mag 36 (1967) S. 242...259
141. N. N.
Mikrophotometer
Fa.; Engis Equipment Comp. Scientific Instrumentation
Div., Morton Grove
TIFO 15 (1967) 11 S. 1
142. Das Leitz. Mikroskopphotometer MPV und seine Anwen-
dungen für quantitative Reflexionsmessungen
Leitz-Mitt. Wiss. u. Techn. Bd IV, Nr. 6
S. 176...180 Sept. 1968
143. Kube, E.,
Nachrichtenübertragung mit Lichtstrahlen
in der Atmosphäre
Nachrichtentechnik 19 (1969) 6 S. 201...207
144. N. N.
Firmendruckschriften vom VEB Carl Zeiss Jena
Nr. 40- G10-1
40-G038-1
40-G610-1
W40- 637-1
145. CZ-Forschungsbericht: Photometrische Photooverviel-
facher (55/67) IV 1965
146. Carmeliet, J.; Lejeune, S.,
Electromechanical Drive Employing Negative
Feedback for Mössbauer Experiments
Nucl. Instr. Meth. 62 (1968) S. 166...168

147. Soos, J. M.,
Operational Amplifier and Function Generator for Use
in Automated "Mössbauer Experiments"
Periodica Polytechnica 10 (1966) 4 S. 345...356
148. Hänel, H.,
Möglichkeiten zur Erzeugung sehr tiefer Frequenzen
Zeitschrift für messen steuern regeln
(Automatisierung) 5 (1962) 1 S. 7
149. Ehrlich, H.,
Entwicklung und Bau eines pneumatischen
Frequenzgenerators
Dipl.-Arb. TU Dresden 1959
150. Rösche, M.,
Entwicklung und Bau eines hydraulischen
Frequenzgenerators
Dipl.-Arb. Inst. F. Regelungstechnik TU Dresden 1960
151. H. Z.
Ein Generator für Tiefstfrequenzen beliebiger
Kurvenform
Elektronik 11 (1962) 10 S. 294
152. Oppelt, W.,
Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge
VEB Verlag Technik Berlin 1964
153. Dash, J. G.; Nussbaum, R. H.,
Relaxation Narrowing of Mössbauer
Gamma Rays
Phys. Rev. Letts. New York 16 (1966) 13 S. 567...570
154. Nershkowitz, N.,
Velocity Shifts in Mössbauer Spectroscopy
Nucl. Instr. Meth. 53 (1967) S. 172
155. Franco, S.; Heberle, J. W.
Line Shape in Mössbauer Spectroscopy
Bull. Am. Phys. Soc. Ser. II 13 (1968) 1 60 CK 8

156. Silsbee, R. I.,
Thermal Broadening of the Mössbauer Line and of
Narrow-Line Electronic Spectra in solids
Phys. Rev. 128 (1962) 4 S. 1726...1733
129 (1963) 6 S. 2835
157. Snyder, H. S.; Wick, G. C.,
Broadening of the Mössbauer Line
Phys. Rev. 120 (1960) 1 S. 128...129
158. Margulies, S.; Ehrmann, J. S.,
Transmission an Line Broadening of Resonance
Radiation Incident on a Resonant Absorber
Nucl. Instr. Meth. 12 (1961) S. 131...137
159. Streitwolf, H. W.,
Methoden zur Berechnung des Energiespektrums
in Idealkristallen
phys. stat. sol. 2 (1962) S. 1595
160. Lu Tan
The Thermal Broadening of the Mössbauer Line
Acta phys. sin. 20 (1964) S. 777...784
161. Margulies, S.; Debrunner, P.; Frauenfelder, H.,
Transmission and Line Broadening in Mössbauer Effect II
NP-11 913 Illinois Univ., Urbana 1961
Abstr. Bibl. Ser. 16 Wien 1965
Nucl. Instr. Meth. 21 (1963) S. 217...231
162. Heberle
Linewidth of Mössbauer Absorption
Nucl. Instr. Meth. 58 (1968) 1 S. 90...92
163. Meisel, W.,
Zur apparativen Verbreiterung der Mössbauer-Linie
Monatsberichte der Deutschen Akademie der Wissen-
schaften 6 (1964) 9 S. 641 Berlin
164. Brafman, H.; Gilad, P.; Hillmann, D.; Lebenbaum, D.;
Wolfsohn, Y.,
Use of the Mössbauer Effect to Measure Small Vibrations
Nucl. Instr. Meth. 53 (1967) S. 13...21

165. Shtrikman, S.,

Br. Pat. Appl. 27802-63 Prov. 12/7/63

(Patent über eine Apparatur zur Messung von kleinen
Geschwindigkeiten mit dem Mössbauereffekt) lag
nicht vor

15. Verzeichnis der Abbildungen

1. Erzeugung der Relativbewegung zwischen Quelle und Absorber
2. Spider (grundlegende Formen)
- 2a. Spider des beschriebenen thermohydraulischen Bewegungssystems und des elektrodynamischen Geschwindigkeitsmeßsystems
3. Parabelbogenfolgen und die zugehörigen differenzierten Kurven
4. Bewegungsmöglichkeiten für federnd aufgehängte Körper und Möglichkeiten der Anregung von Festkörperausdehnungen
5. Hydraulische Bewegungsgeber ohne äußere Reibung
6. Bourdonfederkette
7. Druckwandlergefäßfamilie zur Erzeugung eines geradlinigen druckproportionalen Weges
8. Extreme Deformation der Halbkreiswellen
9. Der hydraulische Antrieb
10. Abmessungen des betrachteten PTFE-Federbalges
11. Unsymmetrischer Doppelbalg und konzentrischer Doppelbalg
12. Zweipunktregelkreis
13. Kontinuierlicher Regelkreis
14. Beschleunigungsmessung
15. Geschwindigkeitsmessung
16. Dynamische Wegmessung
17. Differentialkondensator (Änderung des Plattenabstandes)
- 17a. Differentialkondensator (Änderung der wirksamen Fläche)
18. Elektronische Schaltung des kapazitiven Wegaufnehmers
19. Hell-Dunkel-Hell-Übergang eines Striches bei einer dreihundertsiebzighfachen Vergrößerung
20. Steuerblende
21. Strahlengang des optischen Analogwegmessers
22. Das Blendensystem
- 23a. Rechteckwellengenerator mit einem Relais
- 23b. Integrierglied
- 23c. Integrierverstärker
24. Funktionsverstärker mit integrierten Schaltkreisen

25. Leistungsverstärker und Regelsignalverstärker mit integrierten Schaltkreisen
26. Funktionsgenerator (Röhrenausführung)
27. Leistungsverstärker, Regelsignalverstärker und Polwender
28. Leistungsendstufe

Anl. 1 Schaltbild des Vorsatzgerätes

Anl. 2 Blockschaltbild des elektronischen Interferenzlinienzählers

Tabelle der benutzten Formelzeichen

A	Fläche, Querschnittsfläche
A_B	effektive Balgquerschnittsfläche
α	Volumenausdehnungskoeffizient
α_D	Dämpfungskonstante
b	Blendendurchmesser
β	Neigungswinkel des Brennstrahles zur optischen Achse
C	Kapazität eines Kondensators
C_W	Wärmekapazität
C_L	spezifische Wärme des Kristalles
c	Lichtgeschwindigkeit
Γ	Halbwertsbreite der Emissionslinie
D	Bildfelddurchmesser
d	Durchmesser der Austrittspupille des Spiegelobjektivs
d_B	effektiver Balgdurchmesser
d_{11}	piezoelektrischer Modul
$d_{3/1}$	piezoelektrischer Modul
d_P	Abstand der Platten im Plattenkondensator
d_x	Dicke der Schwingerscheibe
δ	Verlustwinkel
Δ	zur Bezeichnung einer Differenz (Zuwachs einer Größe)
E	Energie der emittierten Quanten
E_0	Nennenergie der emittierten Quanten
E_R	Rückstoßenergie
E_x	elektrische Feldstärke in x-Richtung
e	Elektronenladung
ϵ_0	absolute Dielektrizitätskonstante
ϵ_r	relative Dielektrizitätskonstante

η	Wirkungsgrad
f	Frequenz
Δf	Bandbreite
f_g	Grenzfrequenz
ϕ_S	Lichtäquivalent des Signalstroms
ϕ_N	Lichtäquivalent des Streulichtstroms
ϕ_D	Lichtäquivalent des Dunkelstroms
G	elektrische Leitfähigkeit
h	Planck'sches Wirkungsquant
h_G	halbe Gefäßhöhe
h_S	Abstand der Blende vom Austrittsspiegel des Objektivs
I	SEV-Gleichstrom
I_{Amax}	maximaler Betriebsgleichstrom
I_D	Dunkelstrom
i_r	Rauschstrom
k	Boltzmann'sche Konstante
k_T	Koeffizient der Leitfähigkeitsänderung mit der Temperatur
κ	Leitfähigkeit der Flüssigkeit
L	Abstand des Objektivaustrittsspiegels von der Bildebene
l	Länge des sich ausdehnenden Stabes
l_x	Längenänderung in x-Richtung
λ	spezifische Wärmeleitfähigkeit
M	Masse des Atom, Masse des bewegten Teiles
μ_0	absolute magnetische Permeabilität
μ_r	relative magnetische Permeabilität
n	Anzahl der Wellen, Anzahl der Stufen
ω	Kreisfrequenz
P	Leistung

P_o	eingestrahlte Leistung
P_{abs}	absorbierte Leistung
ΔP	absorbierte Leistung pro Längeneinheit
R	elektrischer Widerstand
R_a	thermischer Außenwiderstand
R_i	thermischer Innenwiderstand
R_W	thermischer Widerstand
R_{ithP}	thermischer Innenwiderstand eines Peltierelementes
R_A	Arbeitswiderstand
R_S	Summenwiderstand
R_v	äquivalenter Rauschwiderstand
r	Bogenradius, Radius
r'	effektiver Bogenradius
S_K	Katodenempfindlichkeit
S_G	Gesamtempfindlichkeit
s	Weg, maximale Balgauslenkung
T	absolute Temperatur
\bar{T}	mittlere Temperatur
t	Zeit
τ	Zeitkonstante oder mittlere Anregungszeit des Energiezustandes
τ_a	Anstiegszeit
U	elektrische Spannung
U_B	Betriebsspannung
U_r	Rauschspannung
U_s	Signalspannung
V	Volumen
V_G	Gesamtverstärkung

v Geschwindigkeit

W_{heiz} Heizenergie

w die Amplitude der Emissionslinie in Abhängigkeit der Energie

x Abstand von der Ebene mit der höchsten Temperatur

x_s betrachtete Strecke in Ausbreitungsrichtung

$\langle x^2 \rangle$ mittlere Auslenkung der Atome im Gitter bei thermischen Schwingungen

Ralf Riebel
69 Jena
Bibliotheksweg 5

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, daß ich die Dissertationsschrift mit dem Thema:

Anordnung zur Erzeugung von extrem niedrigen Geschwindigkeiten hoher Konstanz und Homogenität mit einem optisch kontrollierten thermohydraulischen Bewegungssystem

selbständig verfaßt und dabei nur die in der Arbeit angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Weiterhin versichere ich, daß ich weder die genannten noch eine andere Arbeit an anderer Stelle zur Promotion eingereicht habe.

Ralf Riebel

Jena, d. 2.2.70/1969

Erzeugung der Relativbewegung
zwischen Quelle und Absorber und andere
Methoden der Energieverschiebung von
Gamma-Strahlen in Mossbauerspektrometern

elektromechanisch
(Antrieb mit Elektro-
motor)

elektrostriktiv und mit
reziproken Piezoeffekt

elektrodynamisch

hydraulisch

thermisch

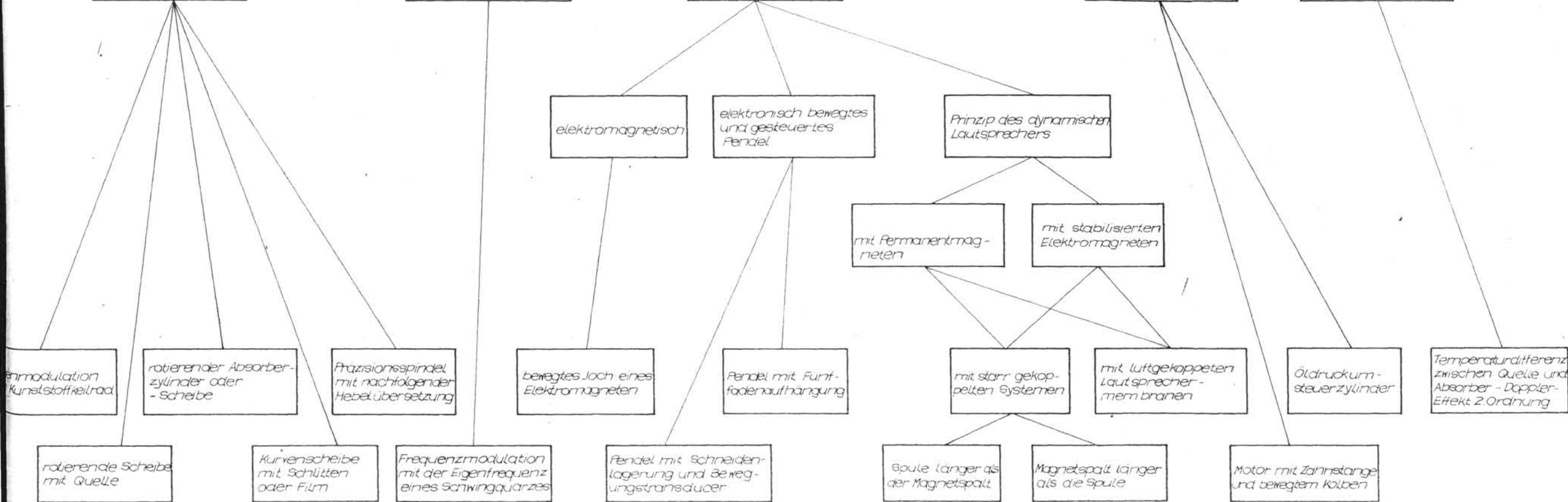
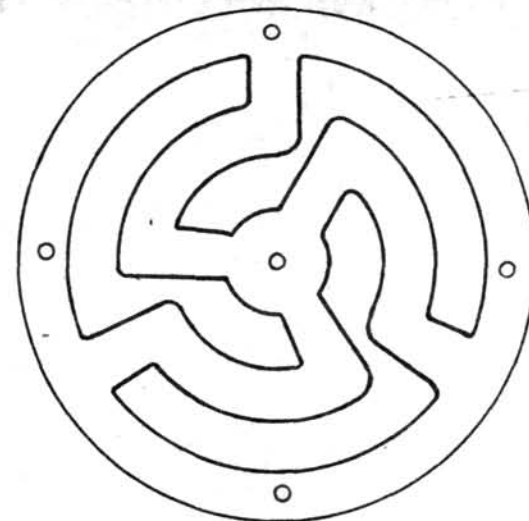
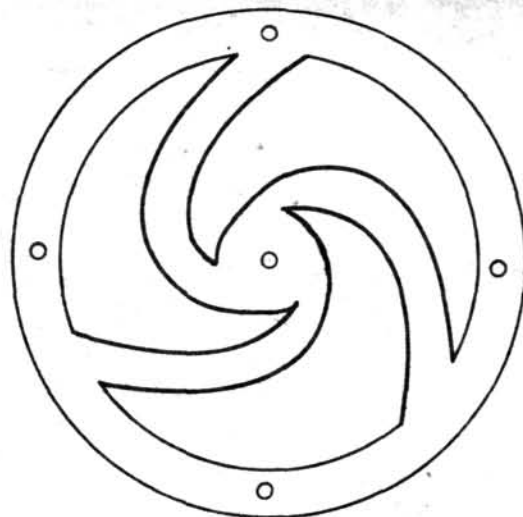
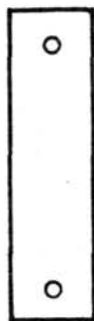


Abb. 1

A



B

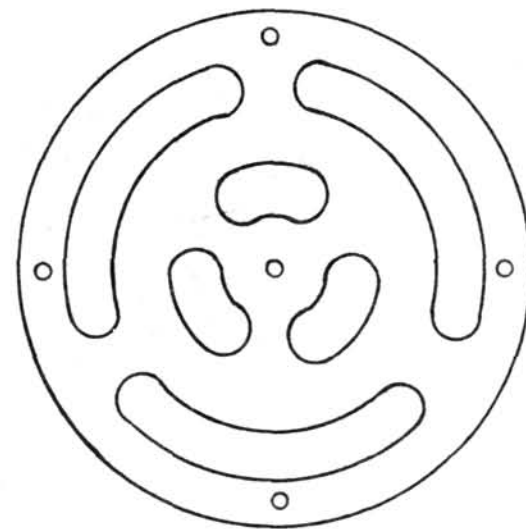
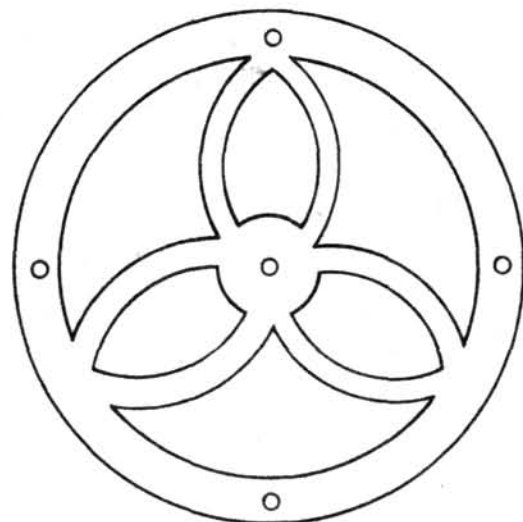
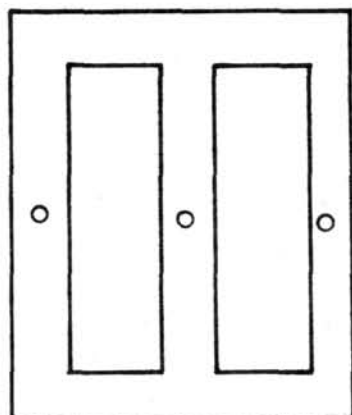
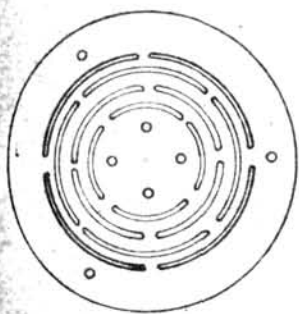


Abb.: 2 **Spider**
(grundlegende Formen)



Spider des beschriebenen thermohydraulischen Bewegungssystems

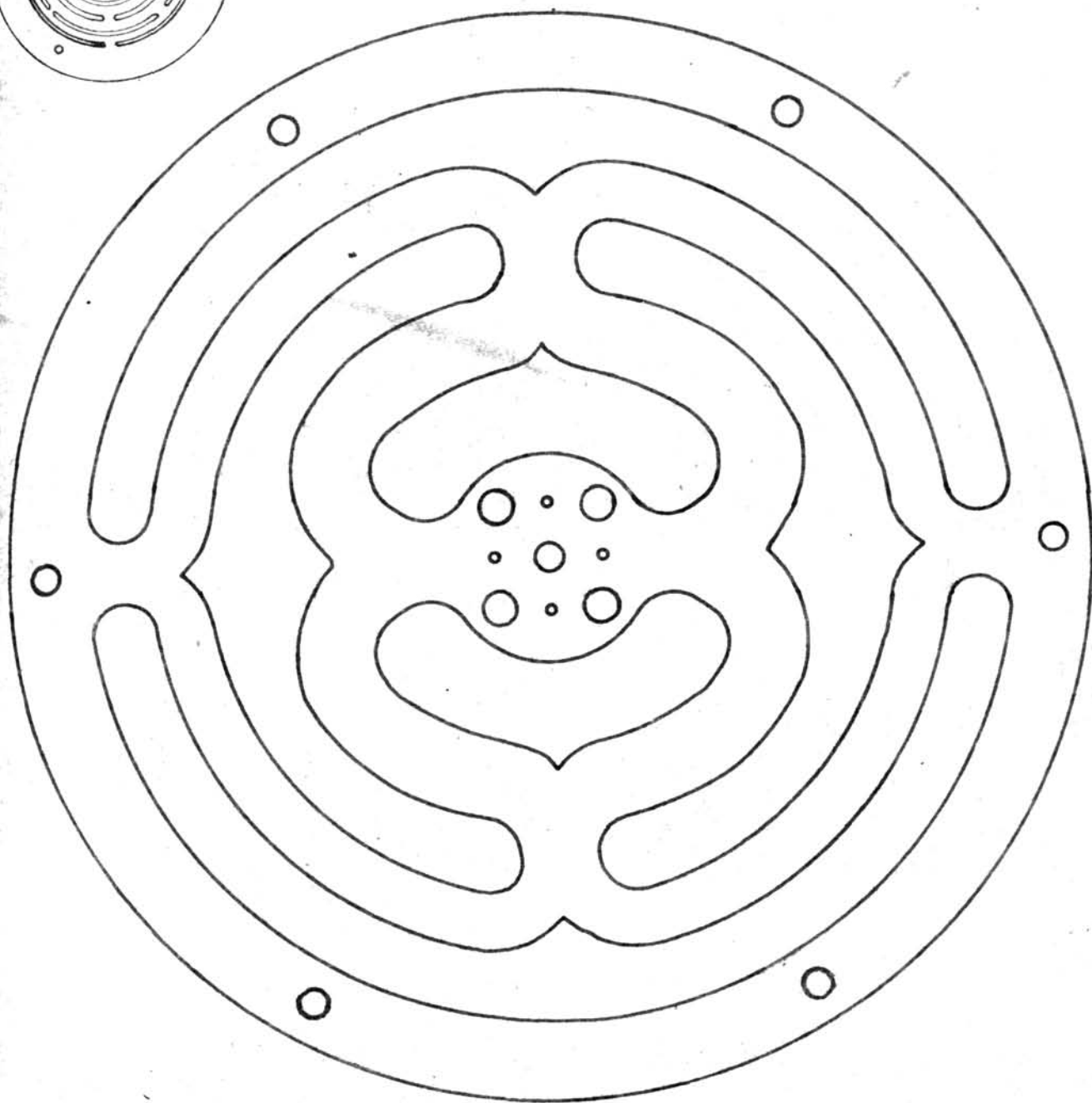
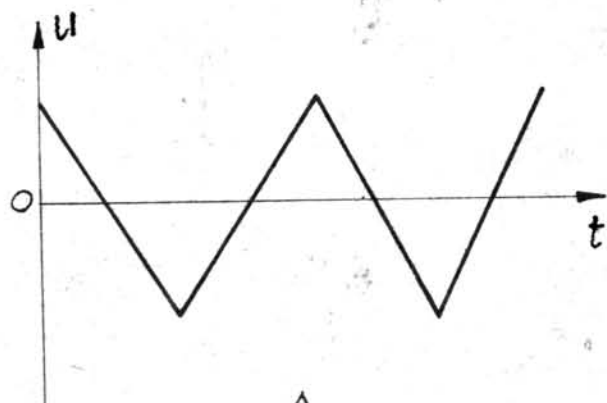
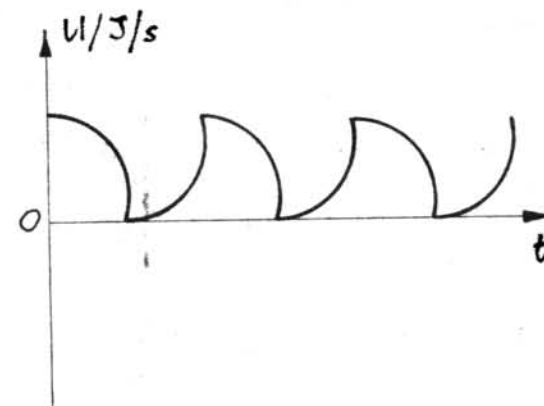
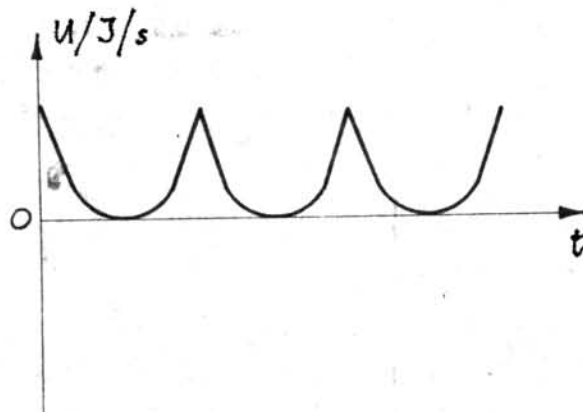
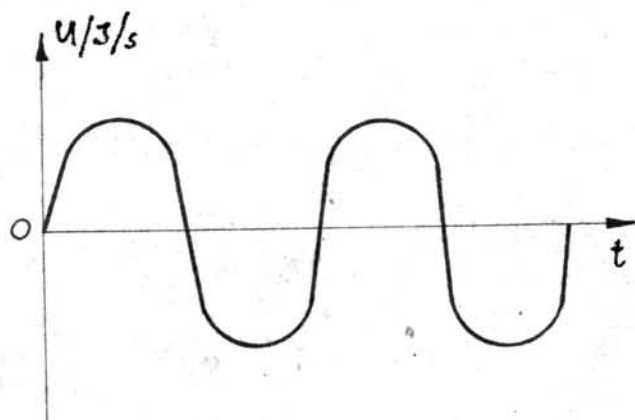
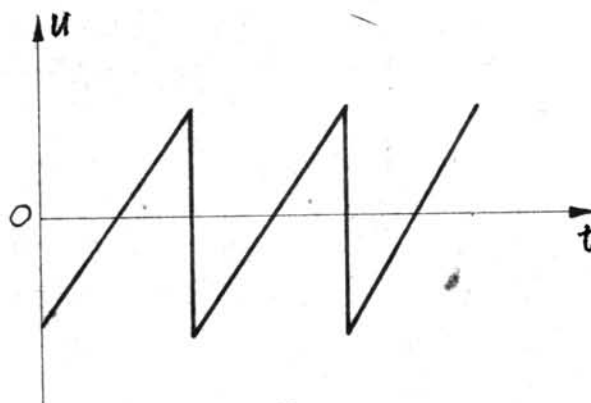


Abb.: 2a

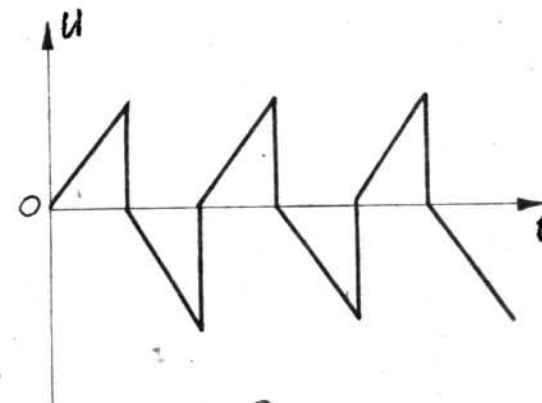
Spider des elektrodynamischen Geschwindigkeitsmeßsystems



A



B



C

Abb.: 3 Parabelbogenfolgen und die zugehörigen differenzierten Kurven

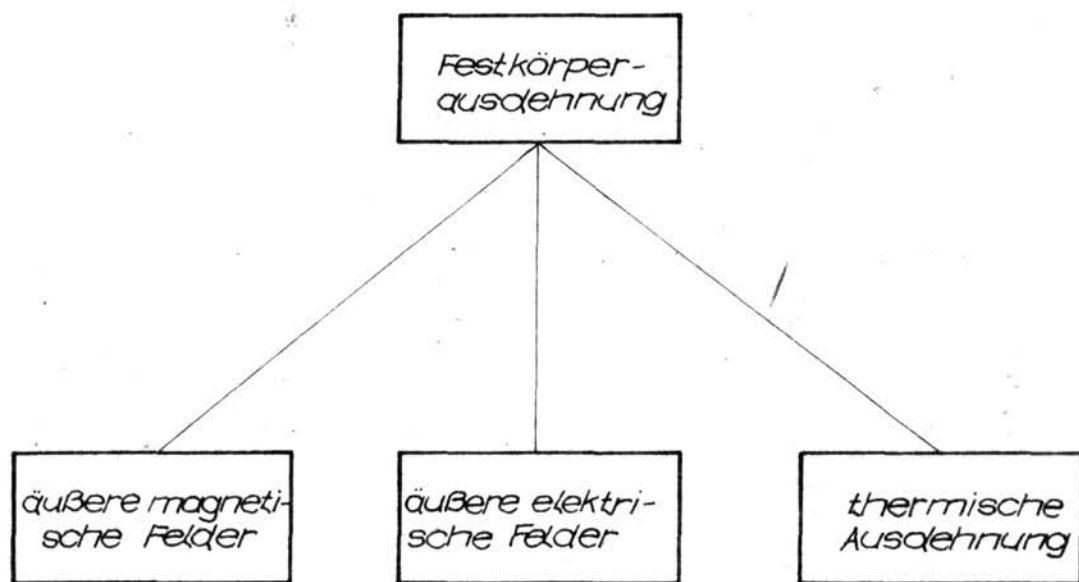
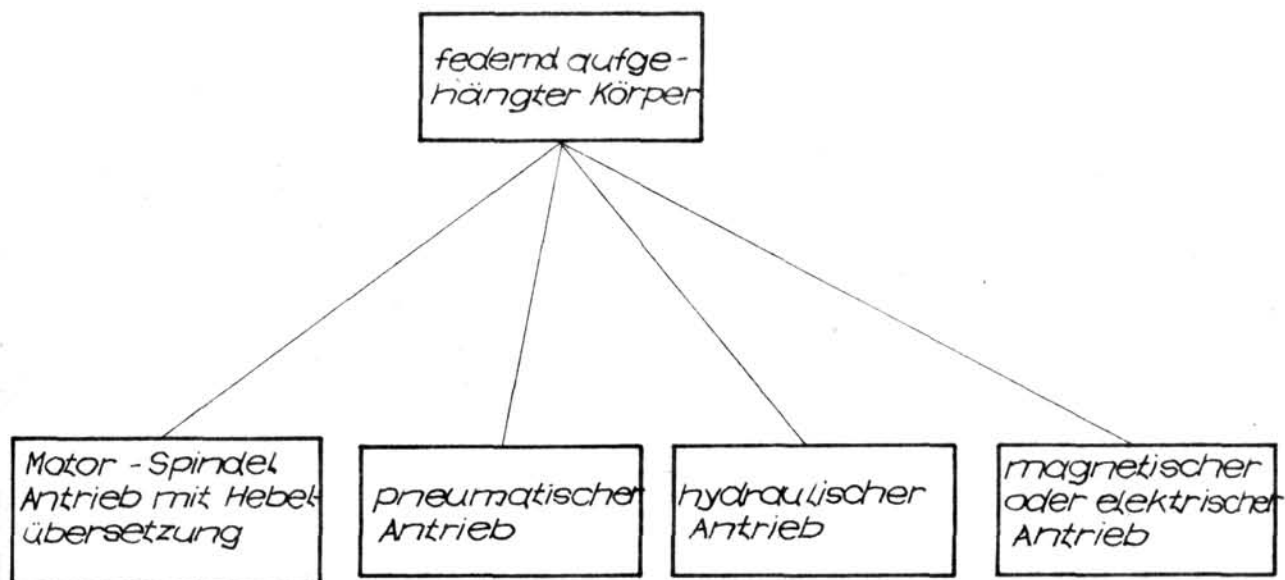
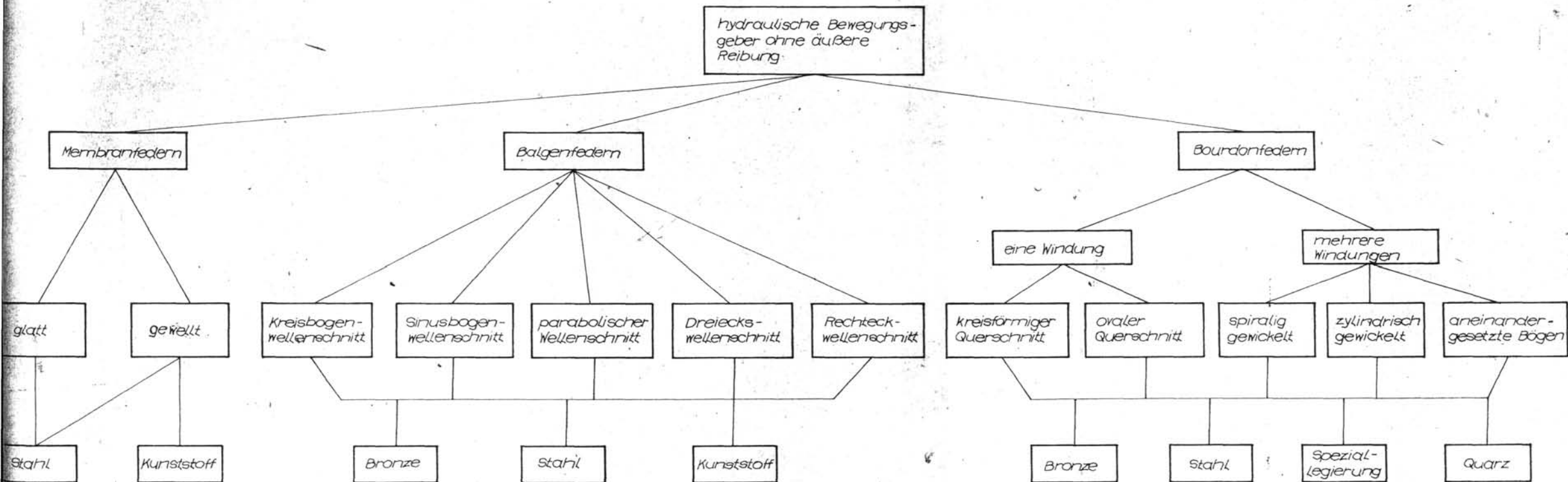


Abb.: 4



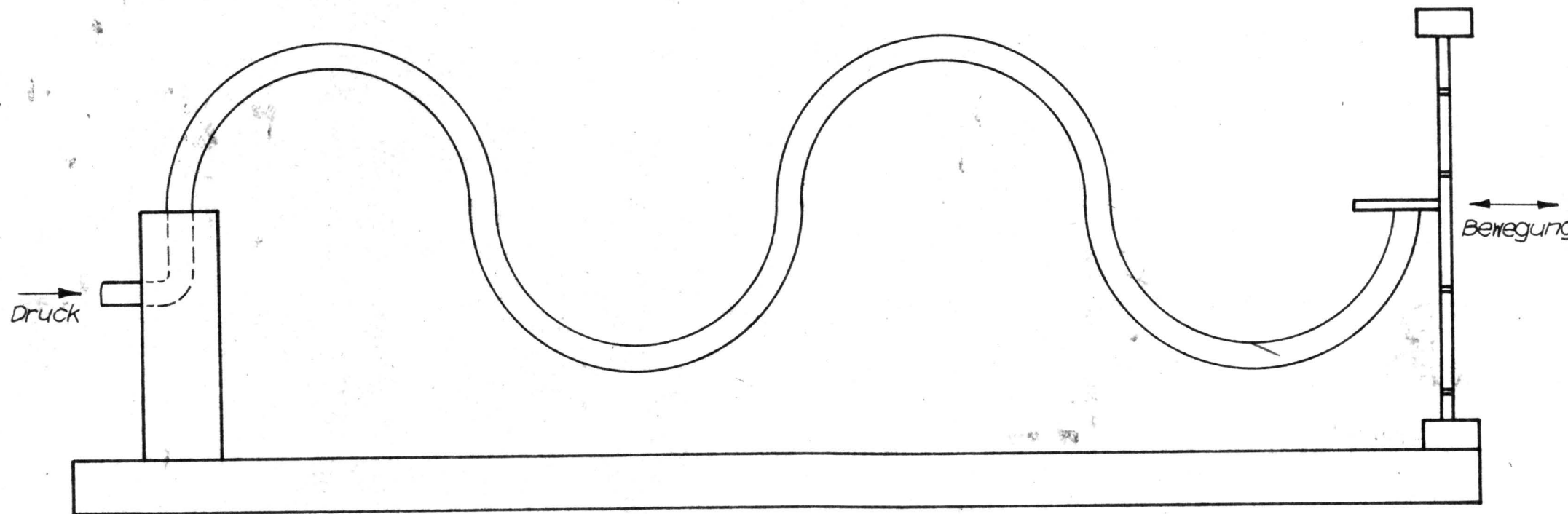
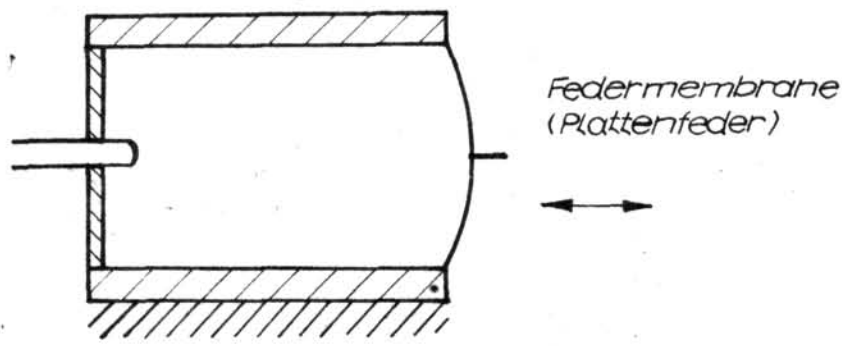
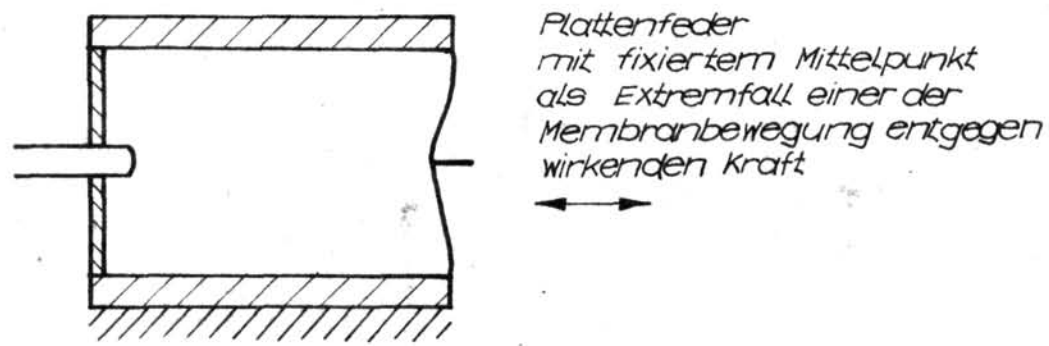


Abb.: 6 **Bourdonfederkette**

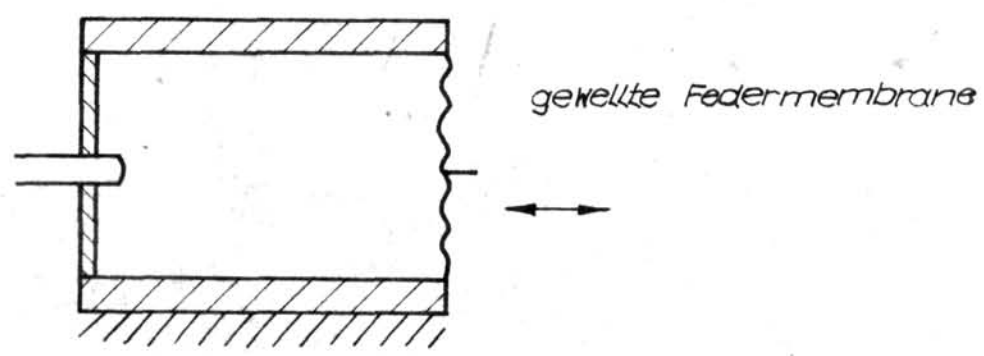
1



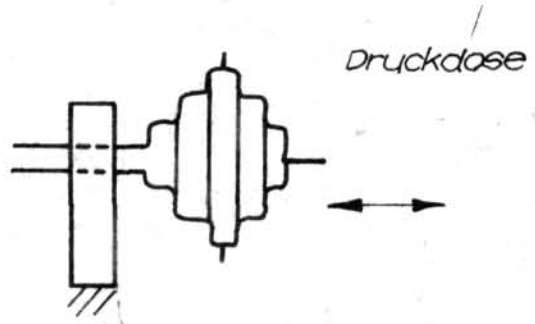
1a



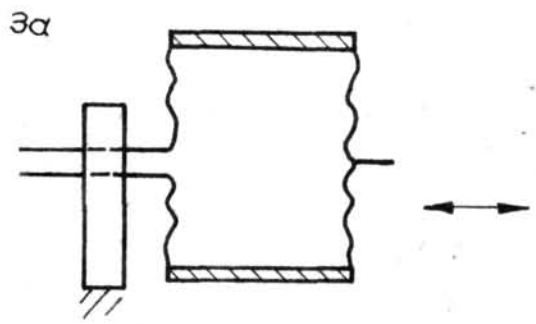
2



3



3a



4

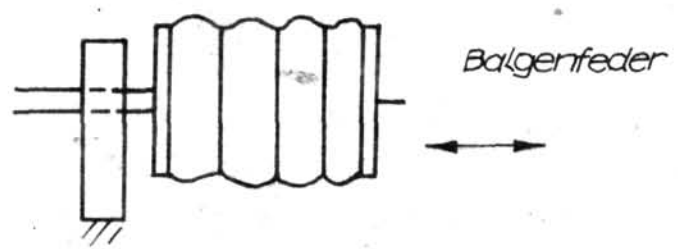


Abb.: 7 Druckwandlergefäßfamilie zur Erzeugung eines geradlinigen druckproportionalen Weges

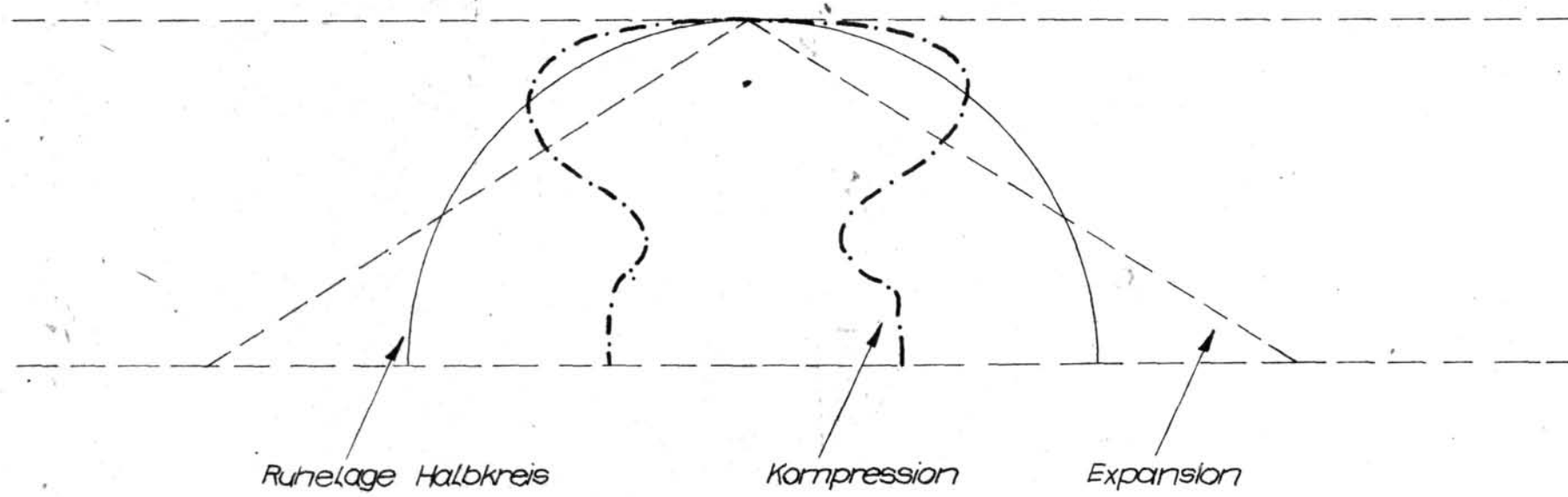


Abb.:8 extreme Deformation der Halbkreiswellen

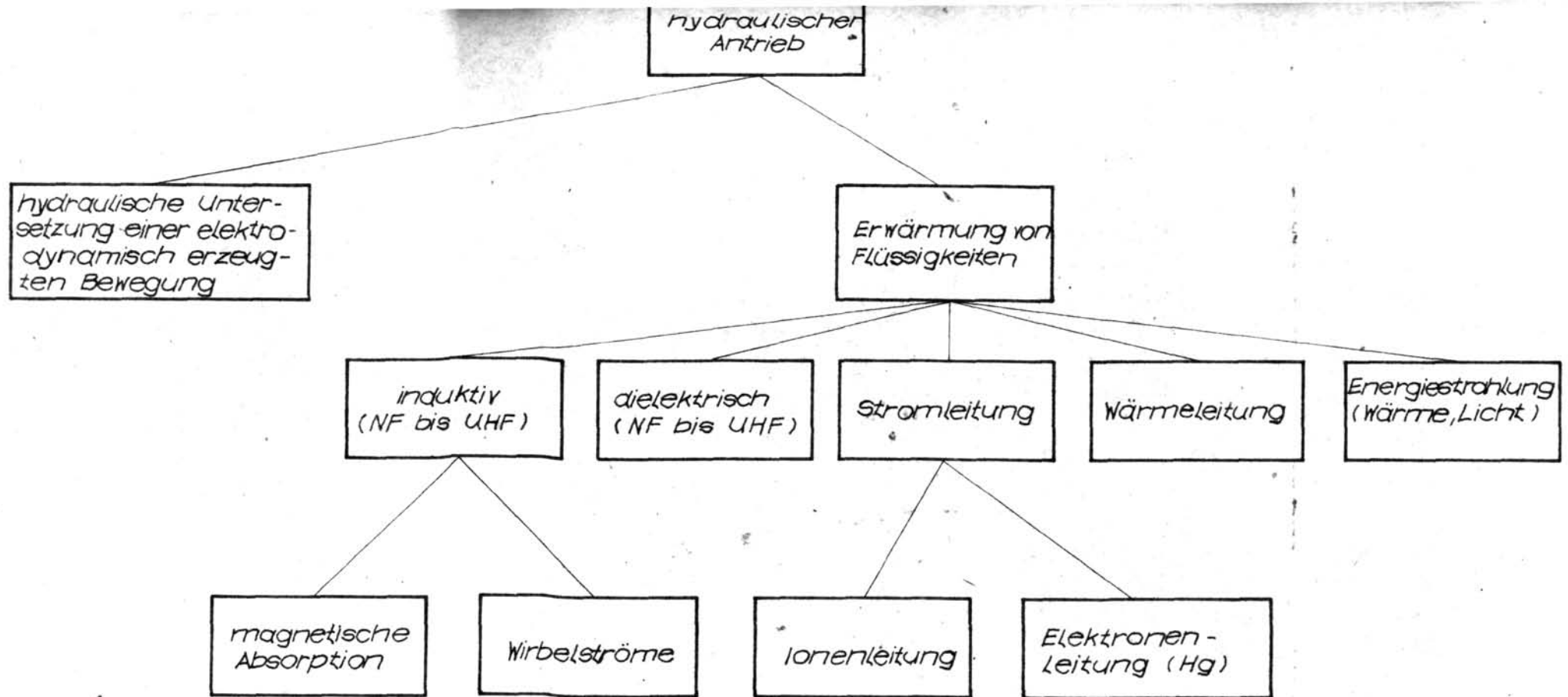


Abb.: 9

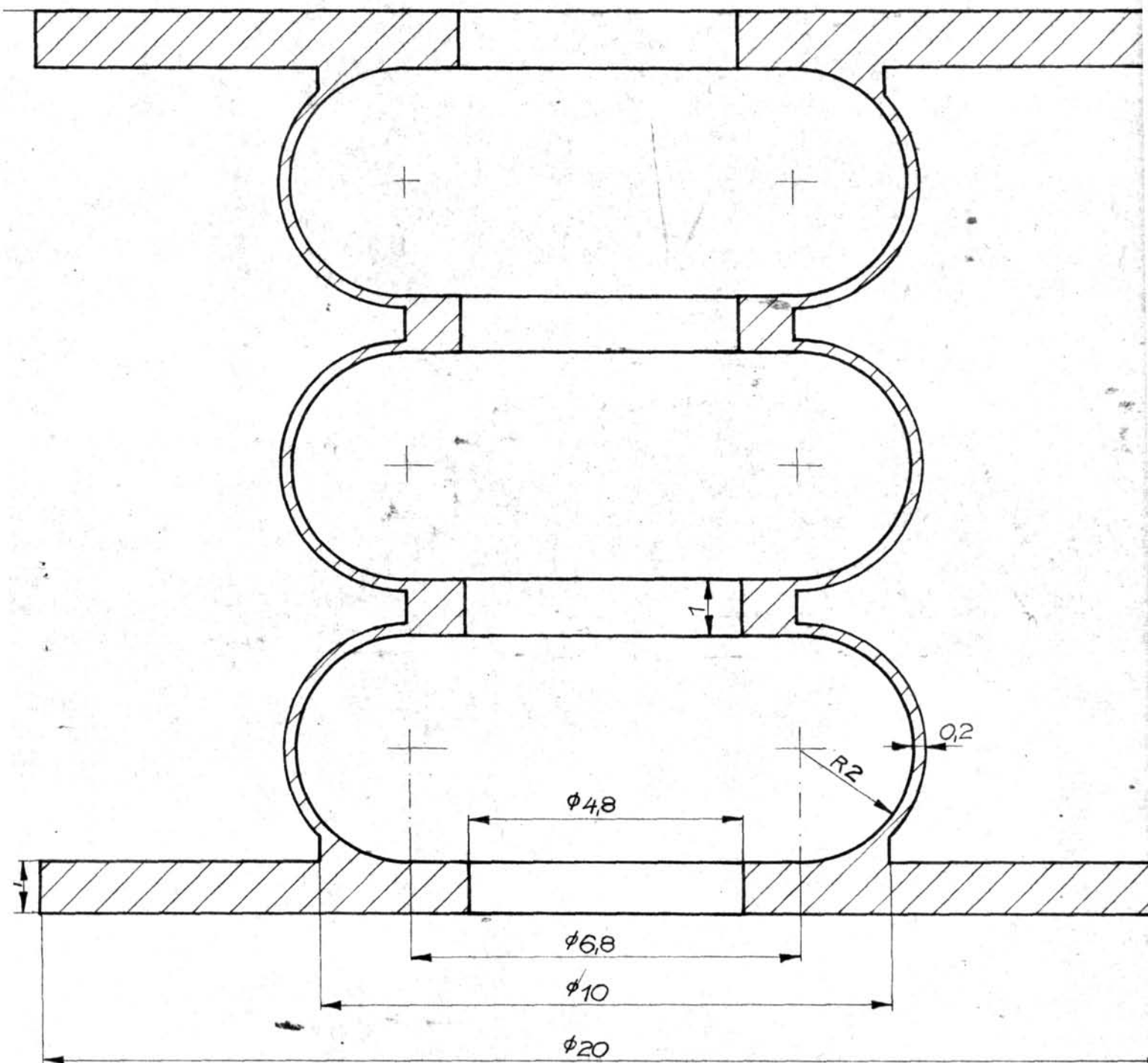


Abb.: 10

Abmessungen des betrachteten PTFE - Federbalges
geschnitten dargestellt

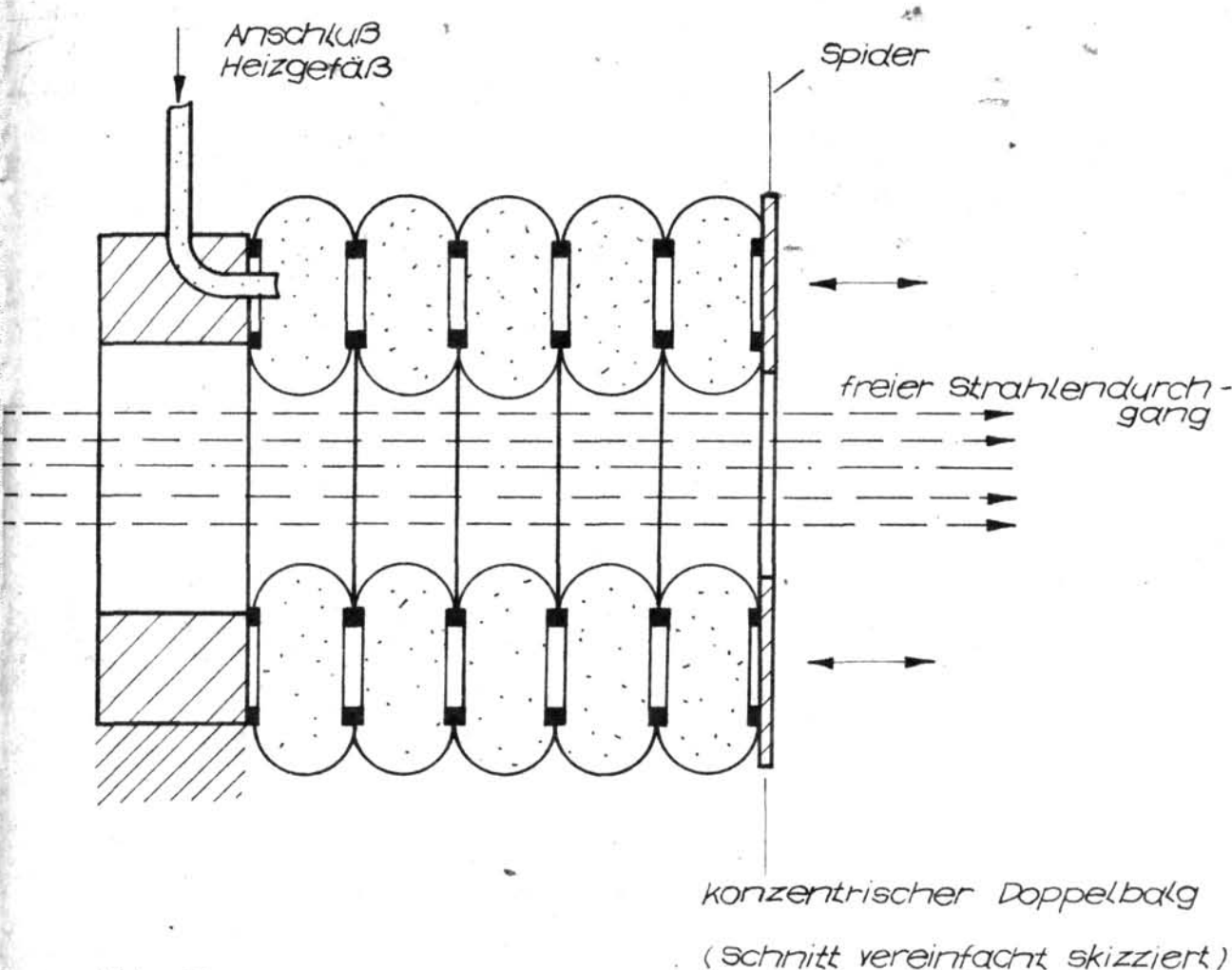
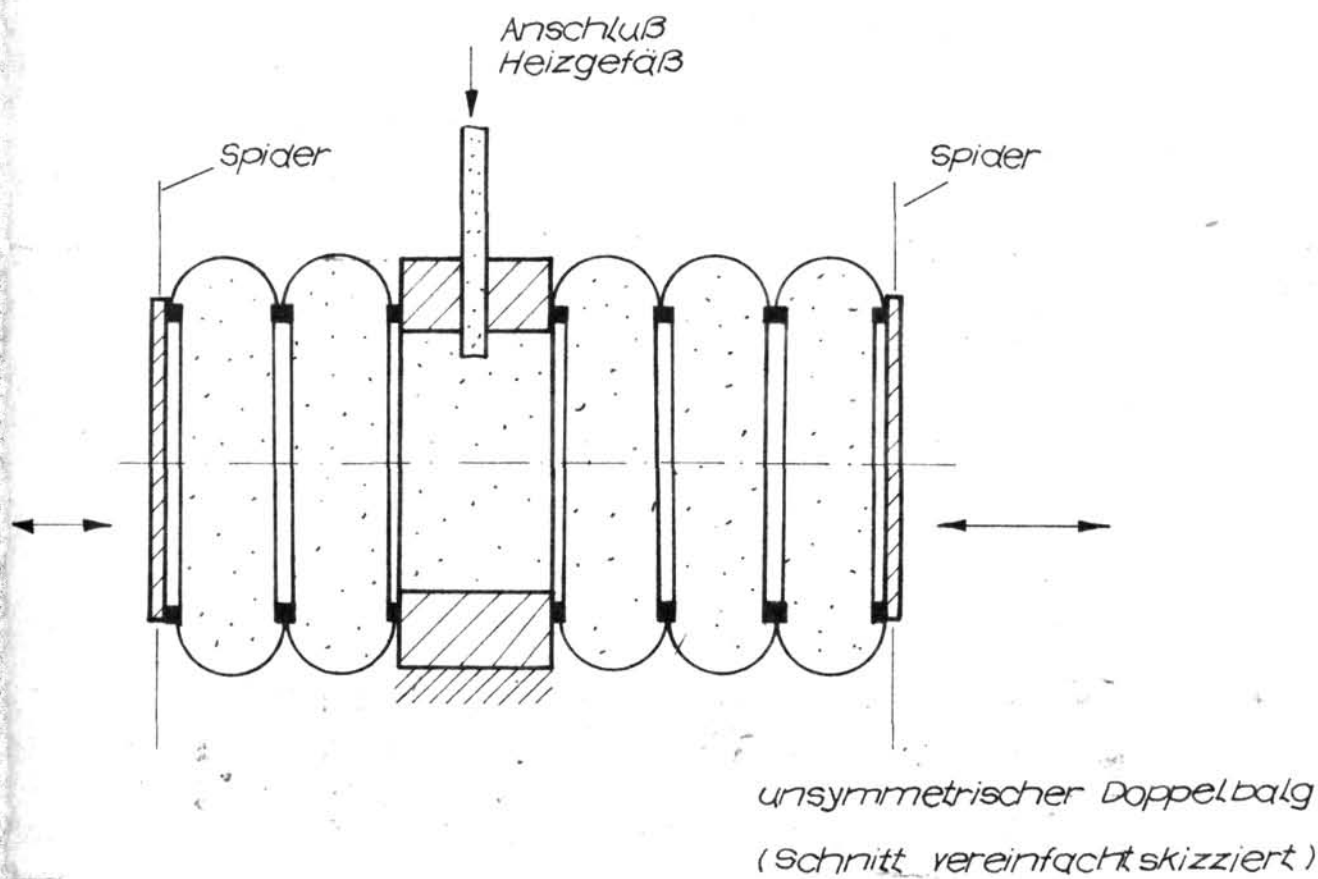


Abb. 11

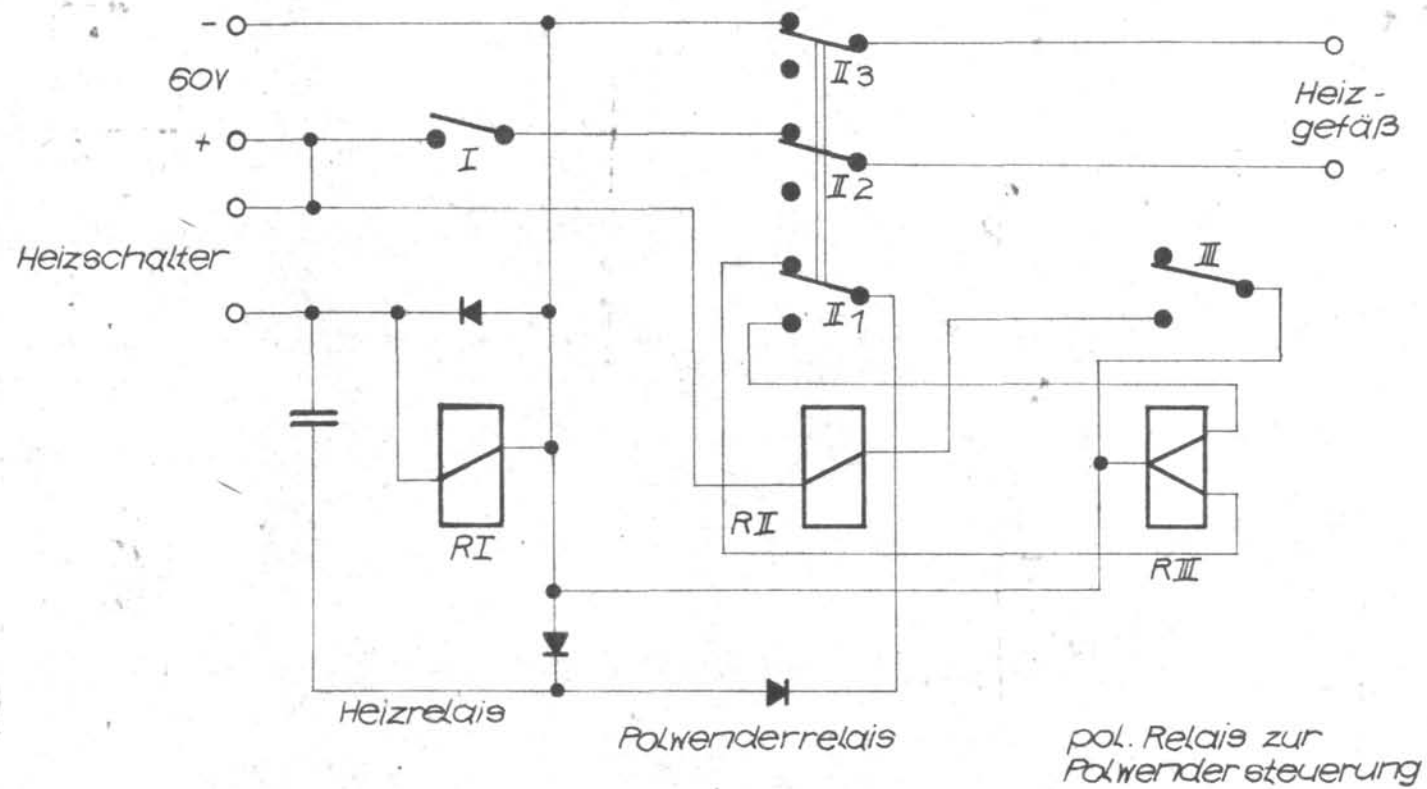


Abb.: 12 Zweipunktregelkreis

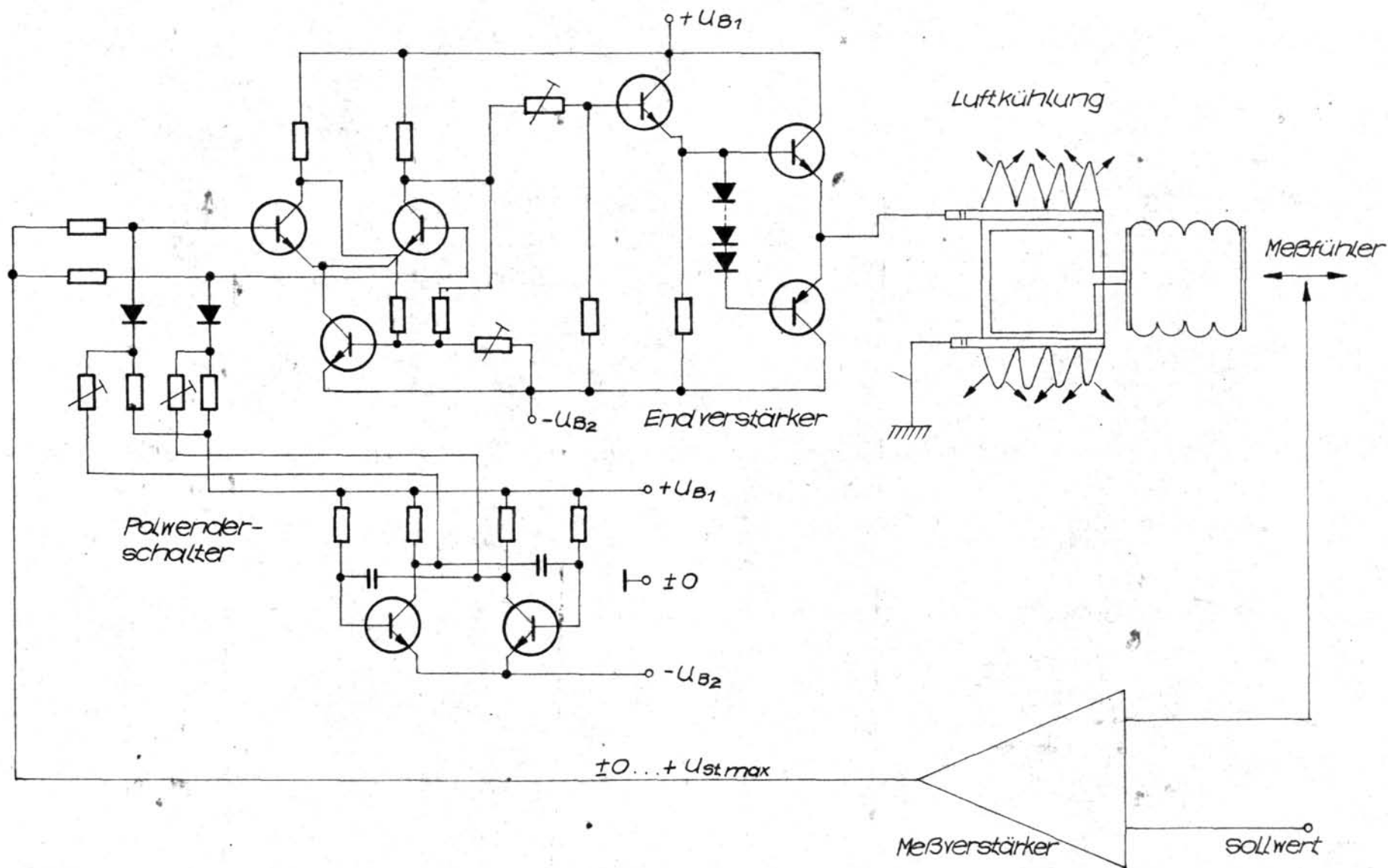


Abb.: 13 kontinuierlicher Regelkreis

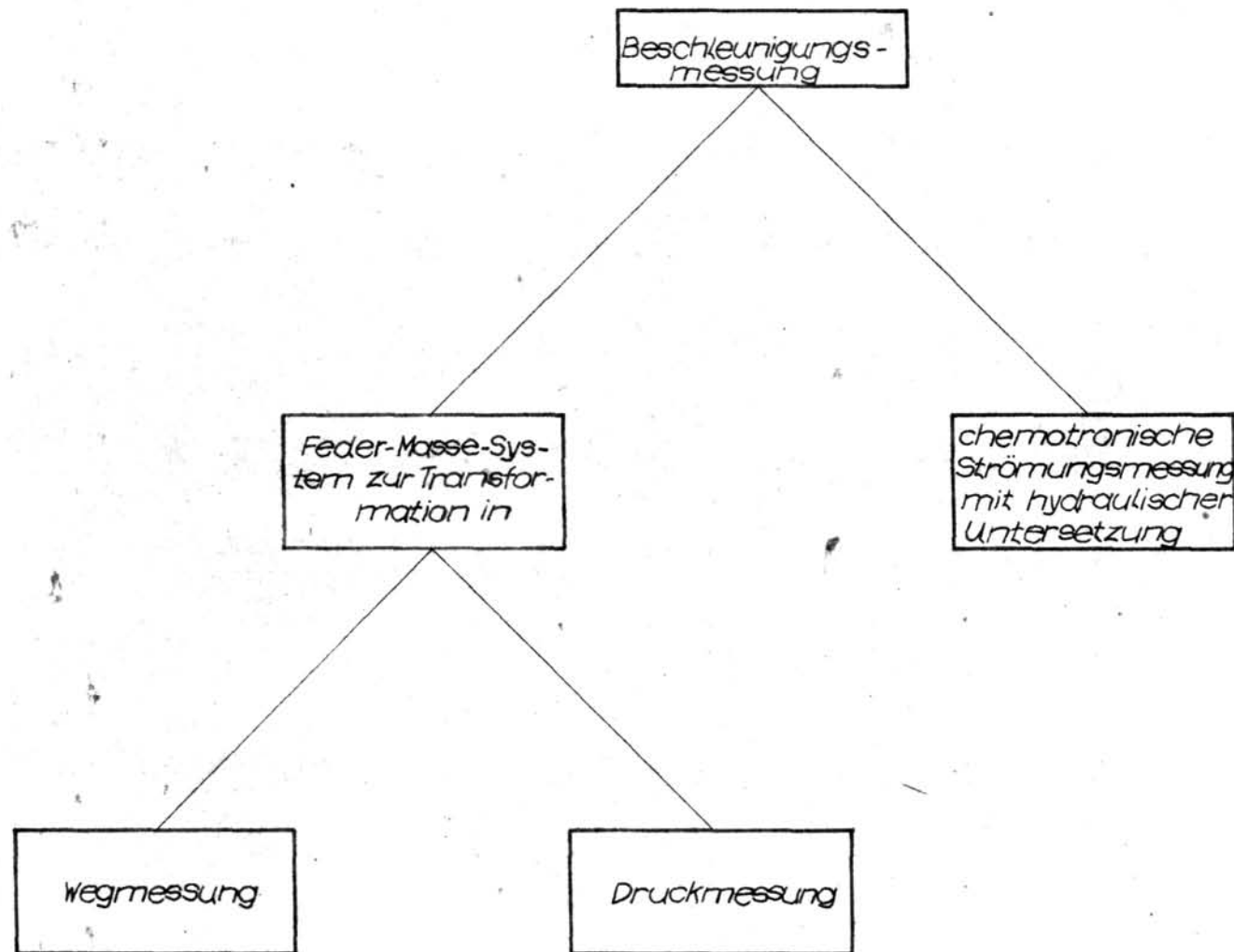


Abb.: 14

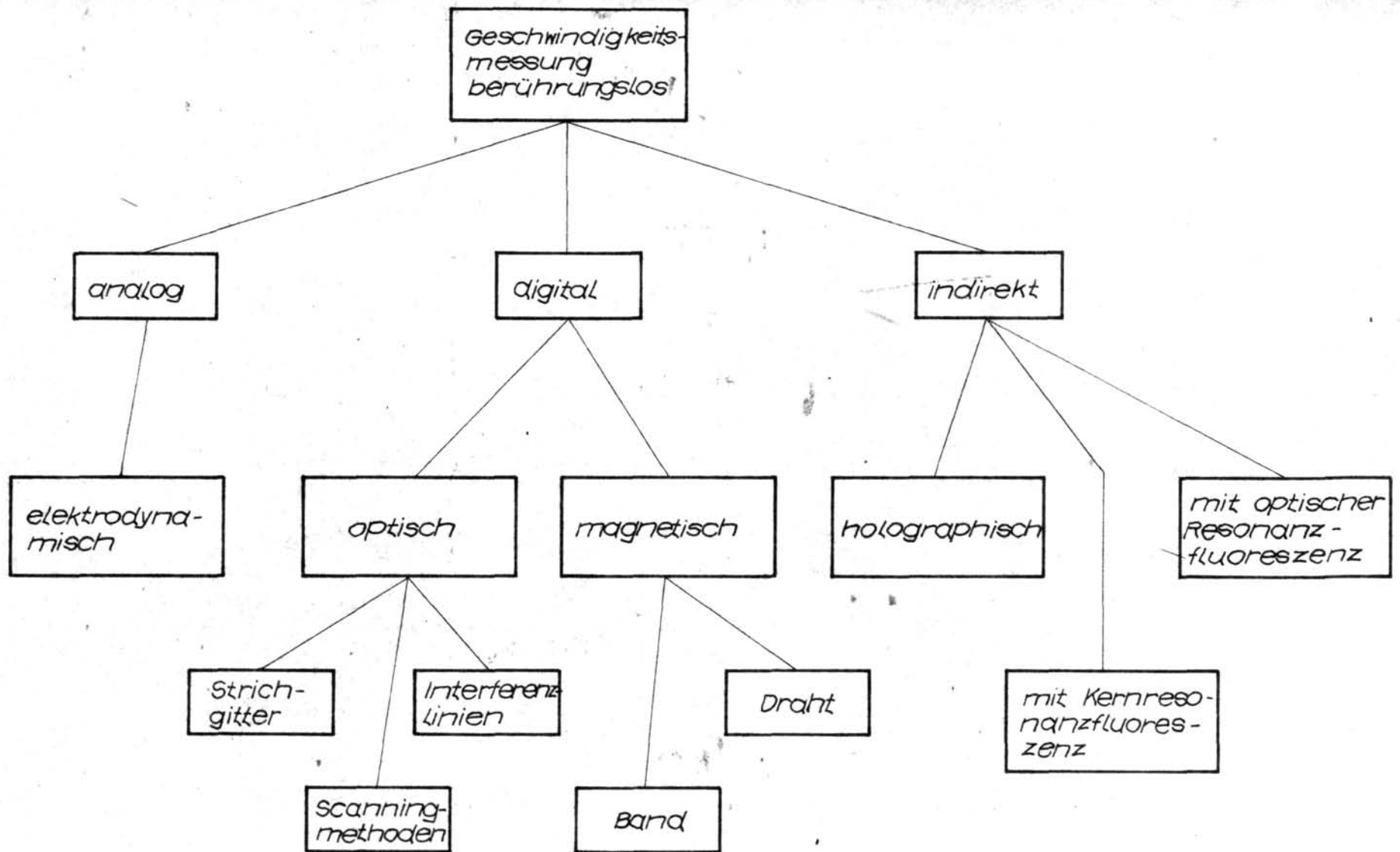


Abb.: 15

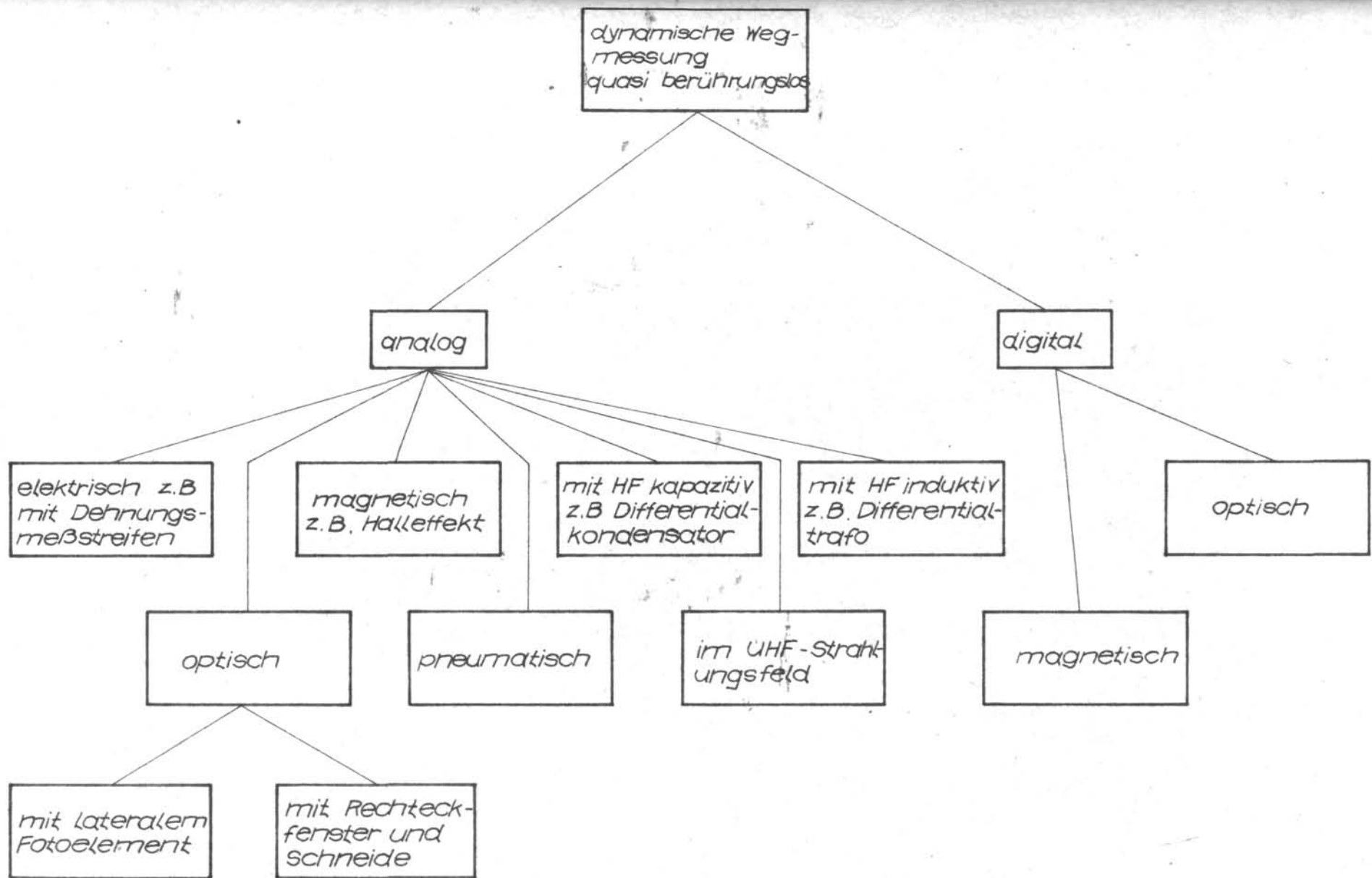


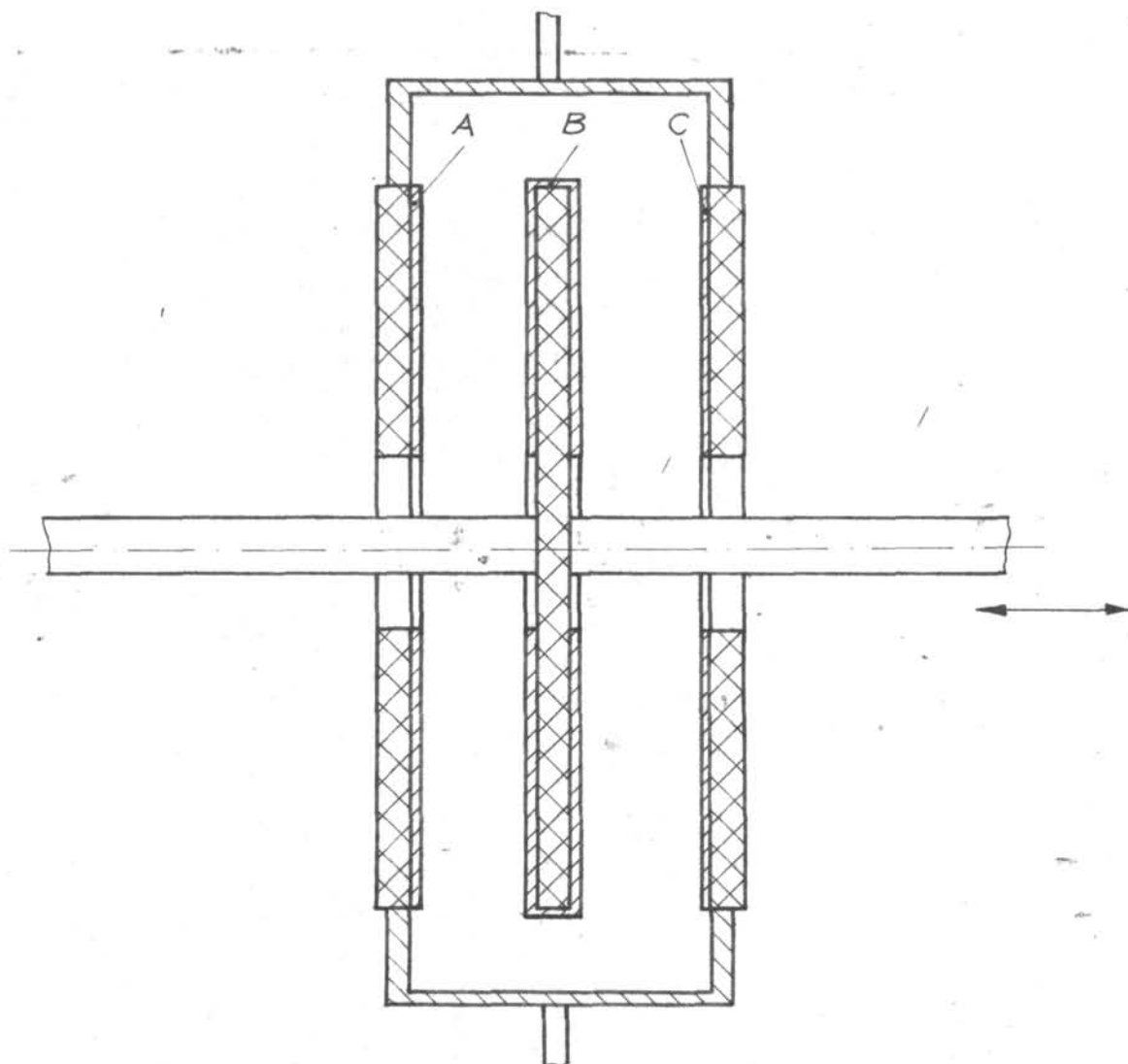
Abb. : 16

Abb.: 17

Differentialkondensator

(Änderung des Plattenabstandes)

Schnittzeichnung (vereinfacht skizziert)



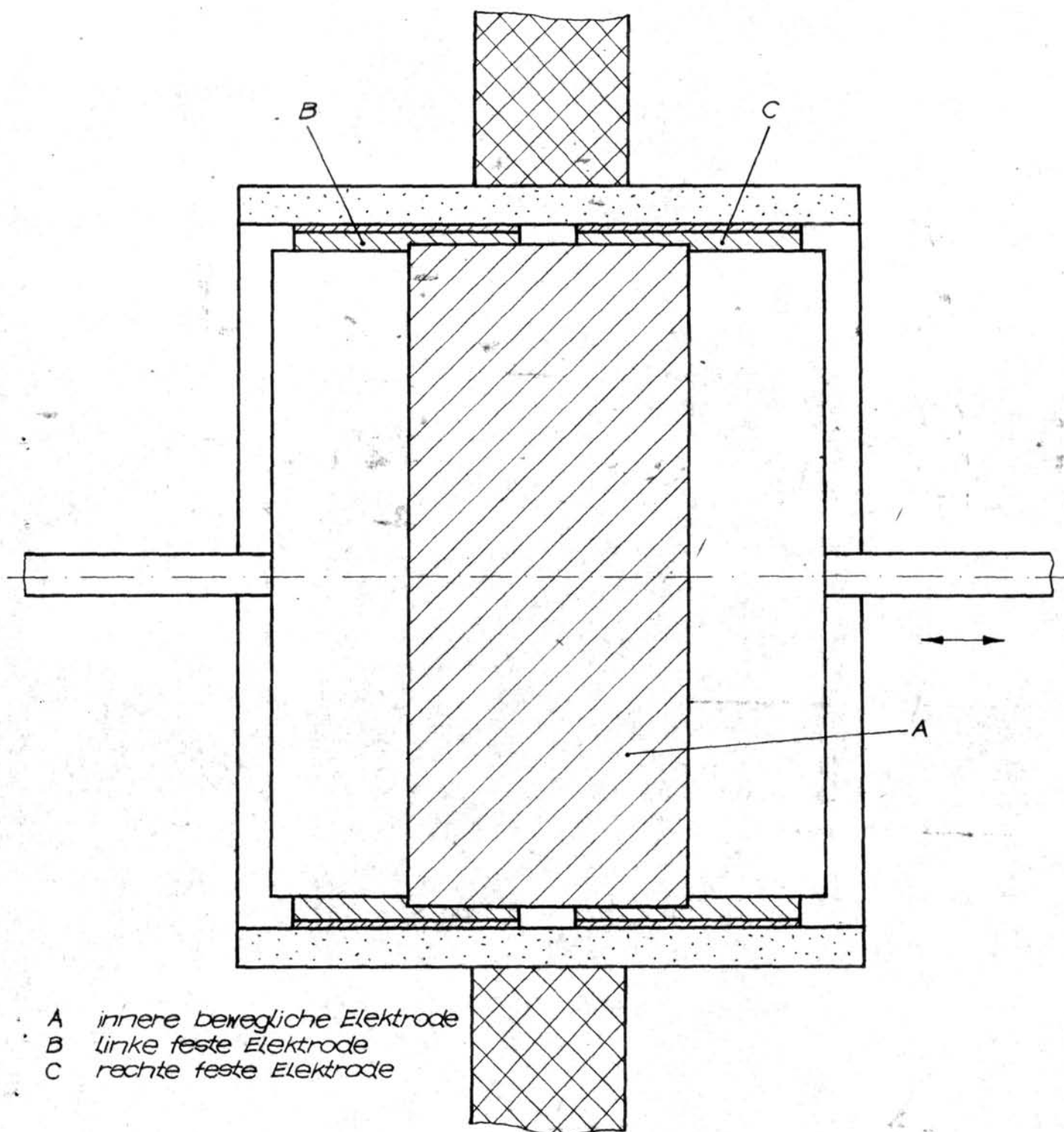
- A linke feststehende Ringelektrode
- B bewegliche Ringelektrode
- C rechte feststehende Ringelektrode

Abb.: 17α

Differentialkondensator

(Änderung der wirksamen Fläche)

Mantelelektroden geschnitten (vereinfacht skizziert)



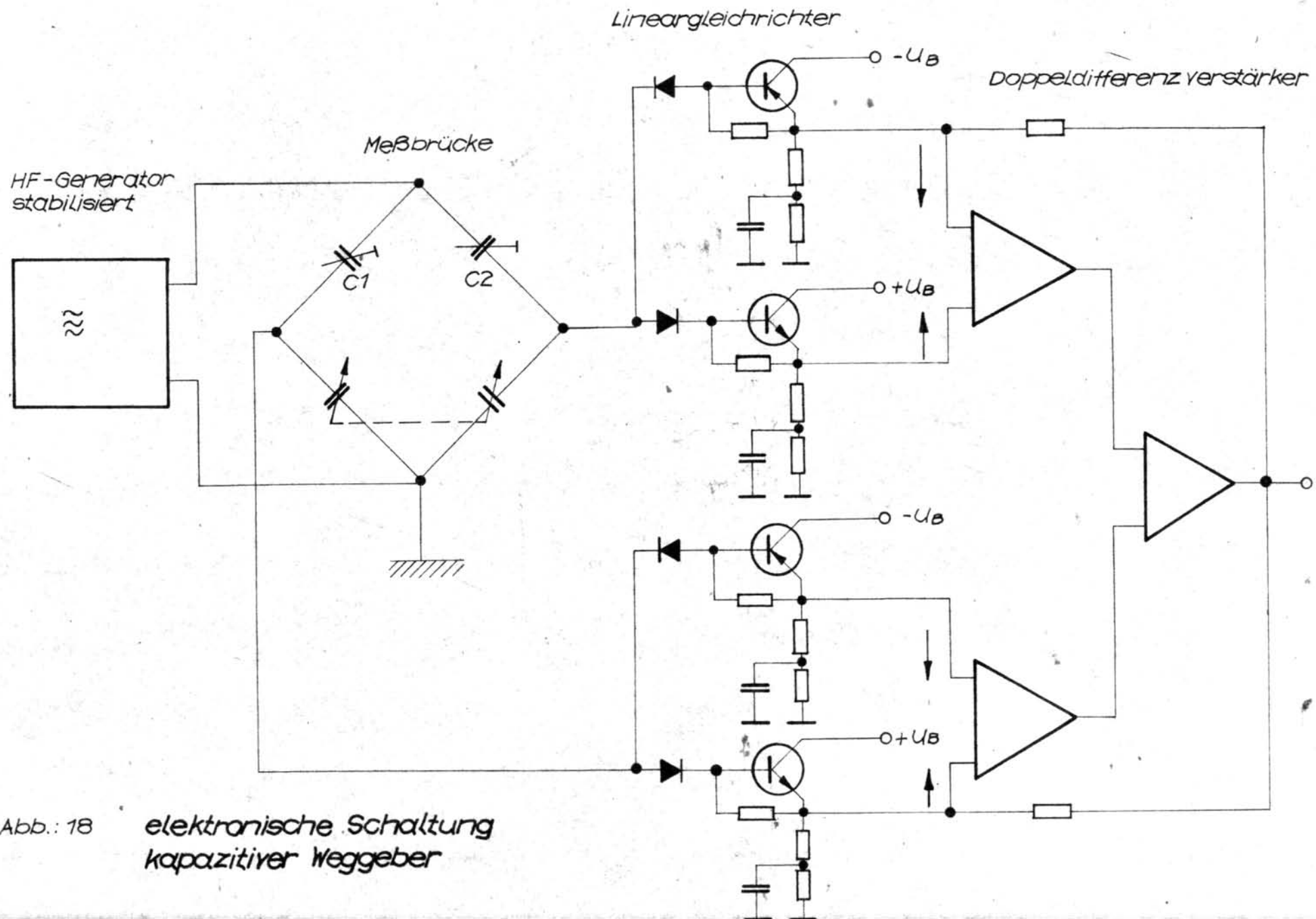


Abb.: 18

elektronische Schaltung
kapazitiver Weggeber

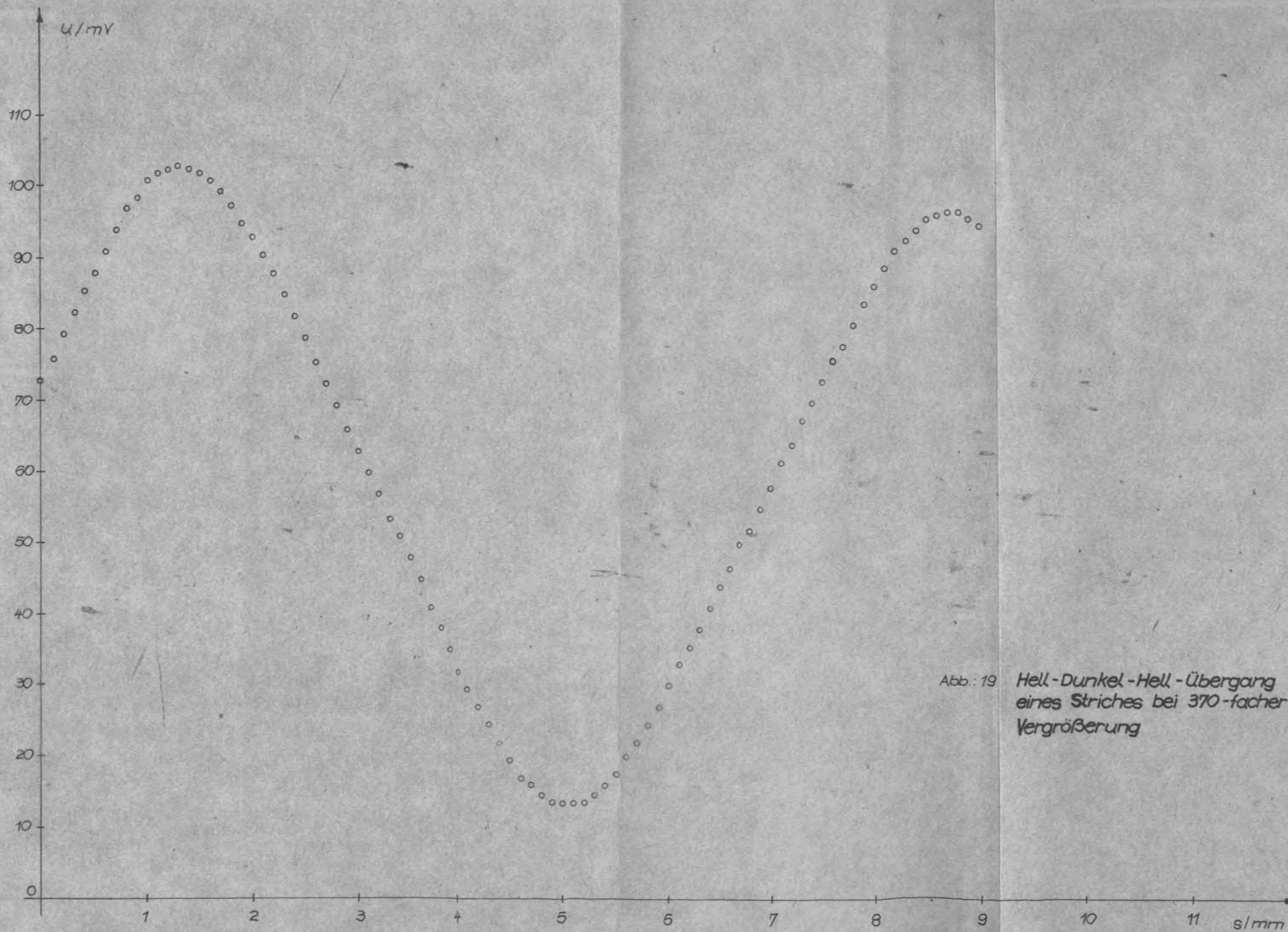
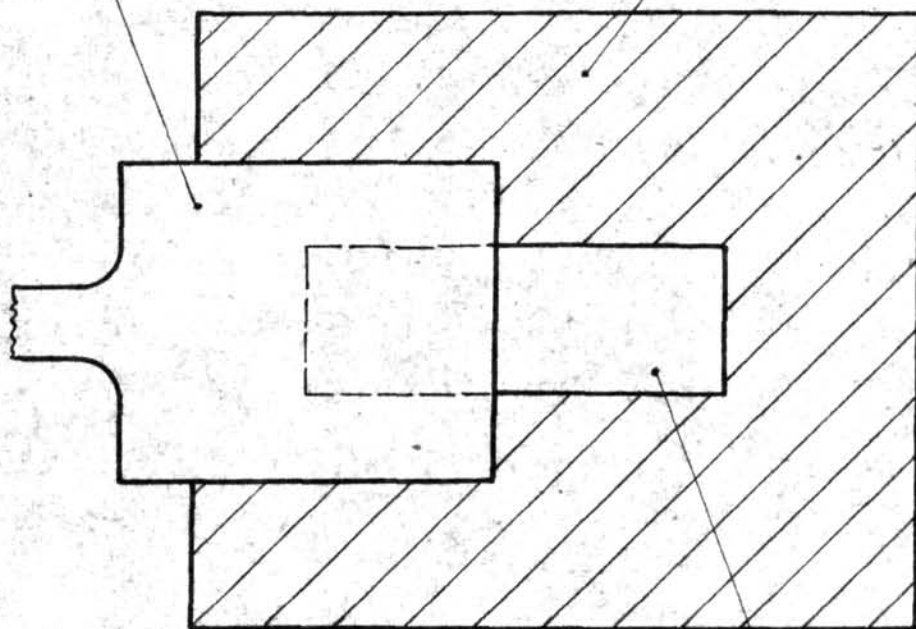


Abb.: 19 Hell-Dunkel-Hell-Übergang
eines Striches bei 370-facher
Vergrößerung

beweglicher Teil

feststehender Teil



Fenster

Abb. : 20 Steuerblende

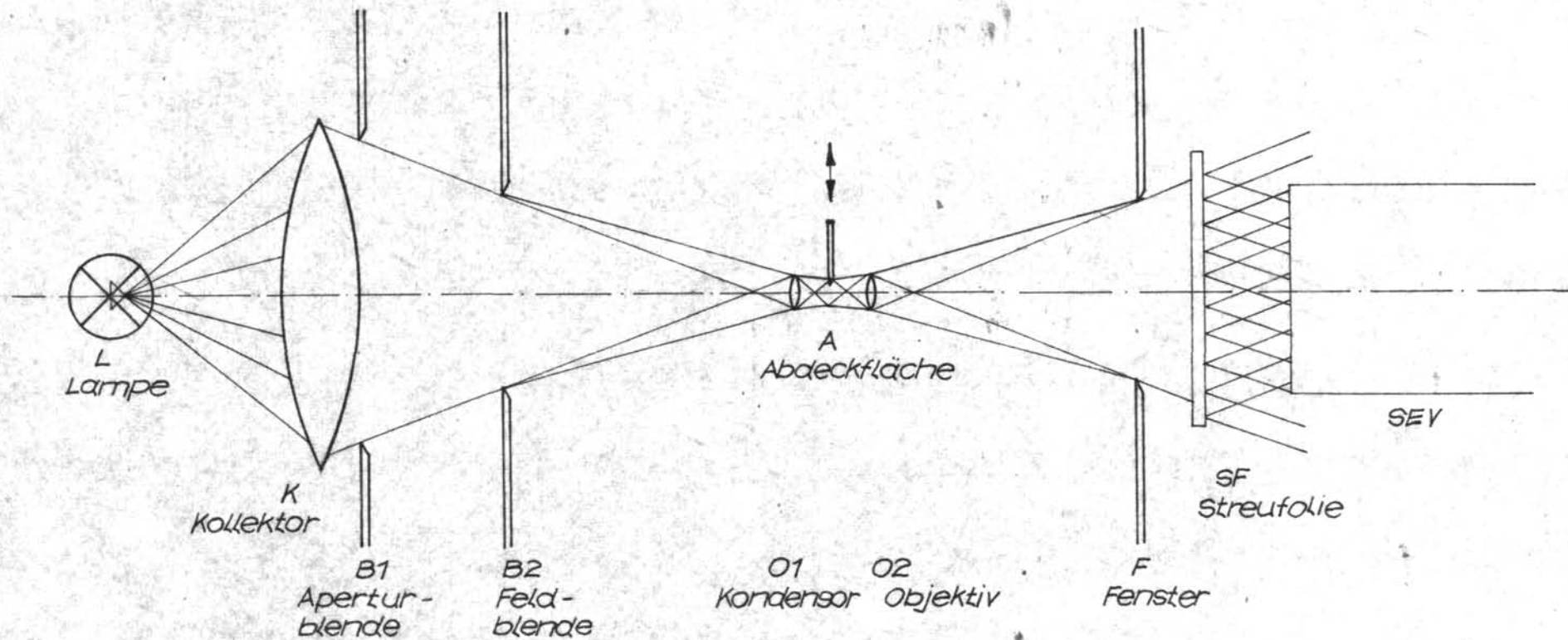


Abb.: 21

Strahlengang (Prinzip)
optischer Analogweggeber

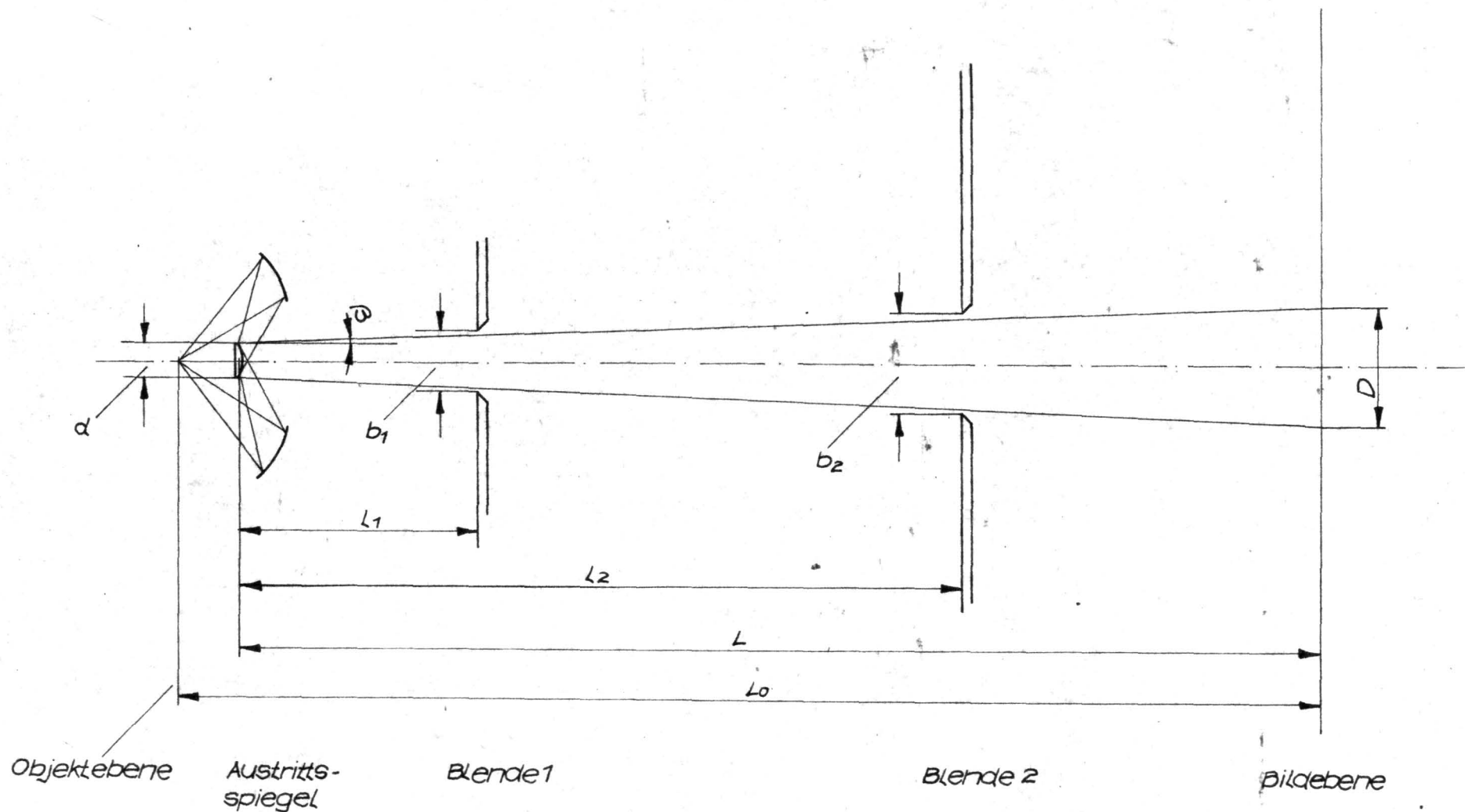


Abb.: 22

Blendensystem

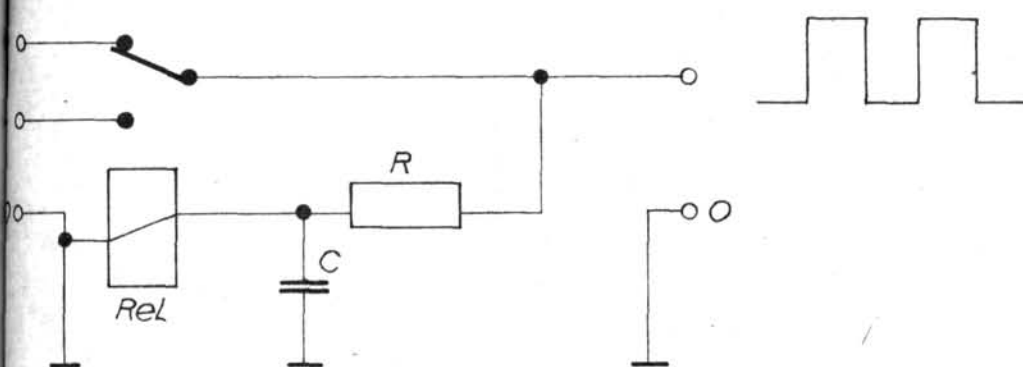


Abb.: 23a Rechteckwellen-
generator mit
einem Relais

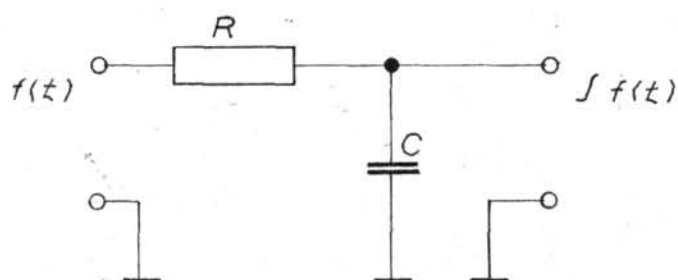


Abb.: 23b Integrierglied

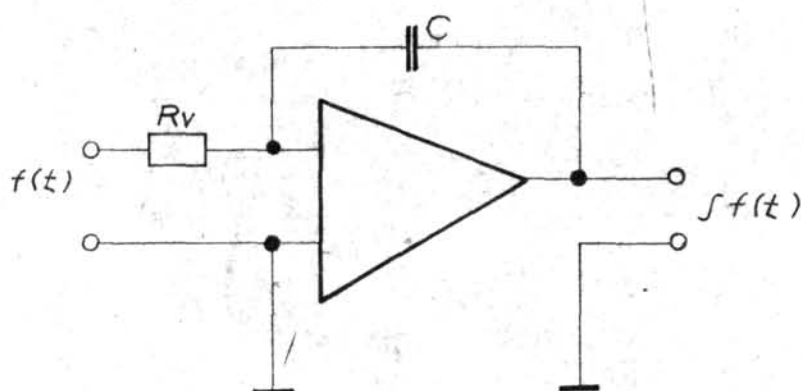


Abb.: 23c Integrierverstärker

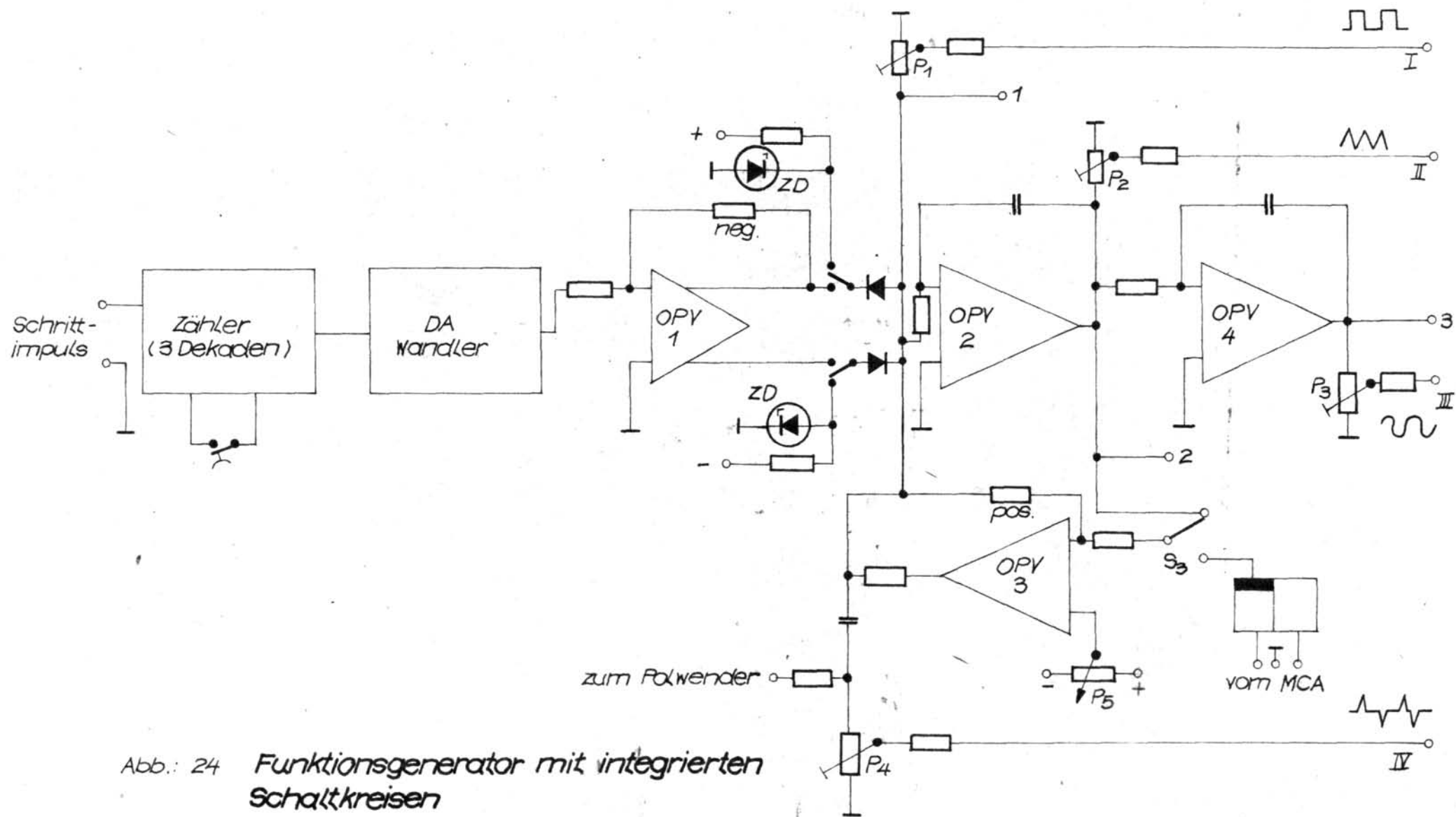


Abb.: 24 Funktionsgenerator mit integrierten Schaltkreisen

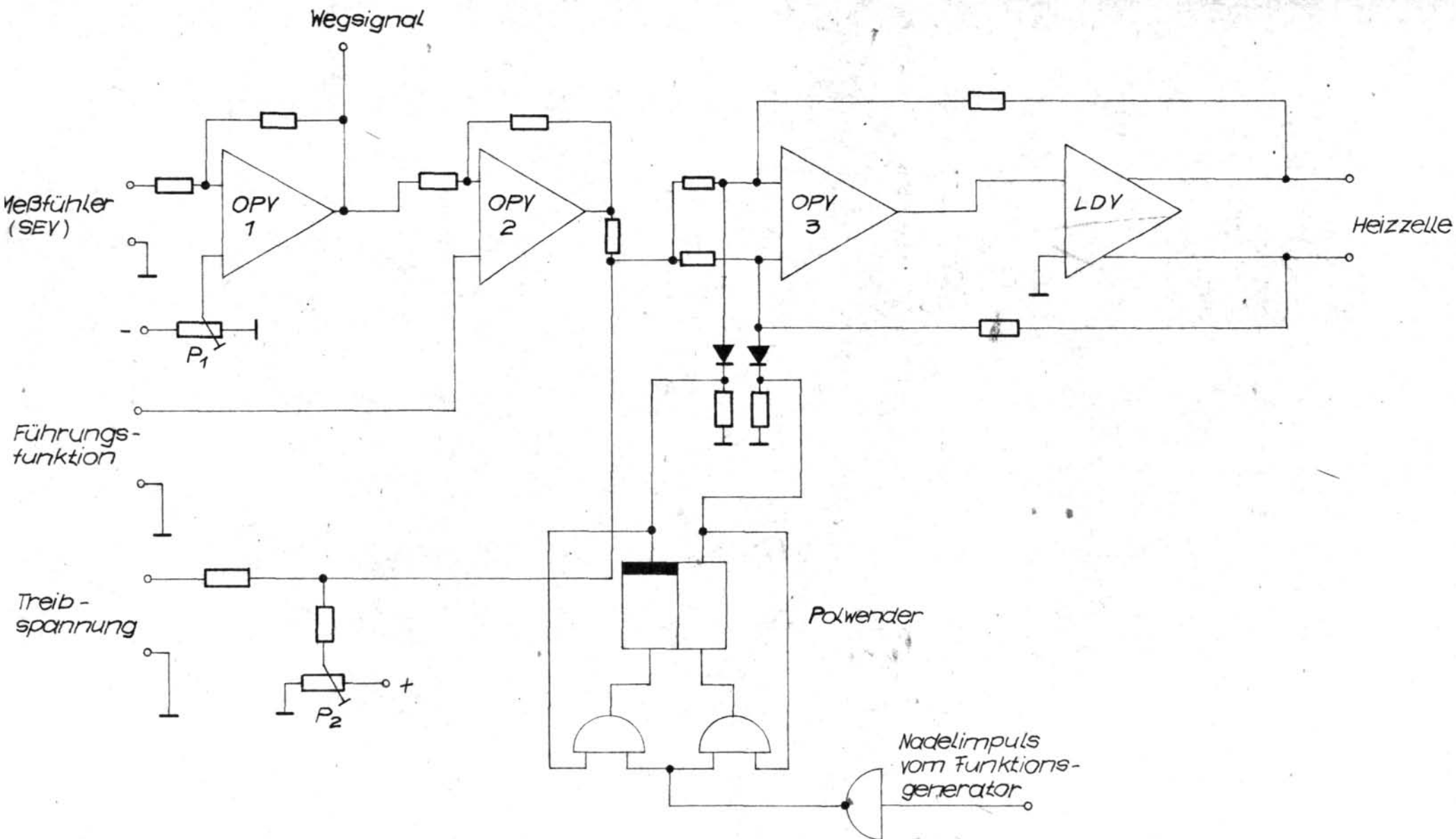


Abb.: 25 **Leistungsverstärker und Regelsignalverstärker mit integrierten Schaltkreisen**

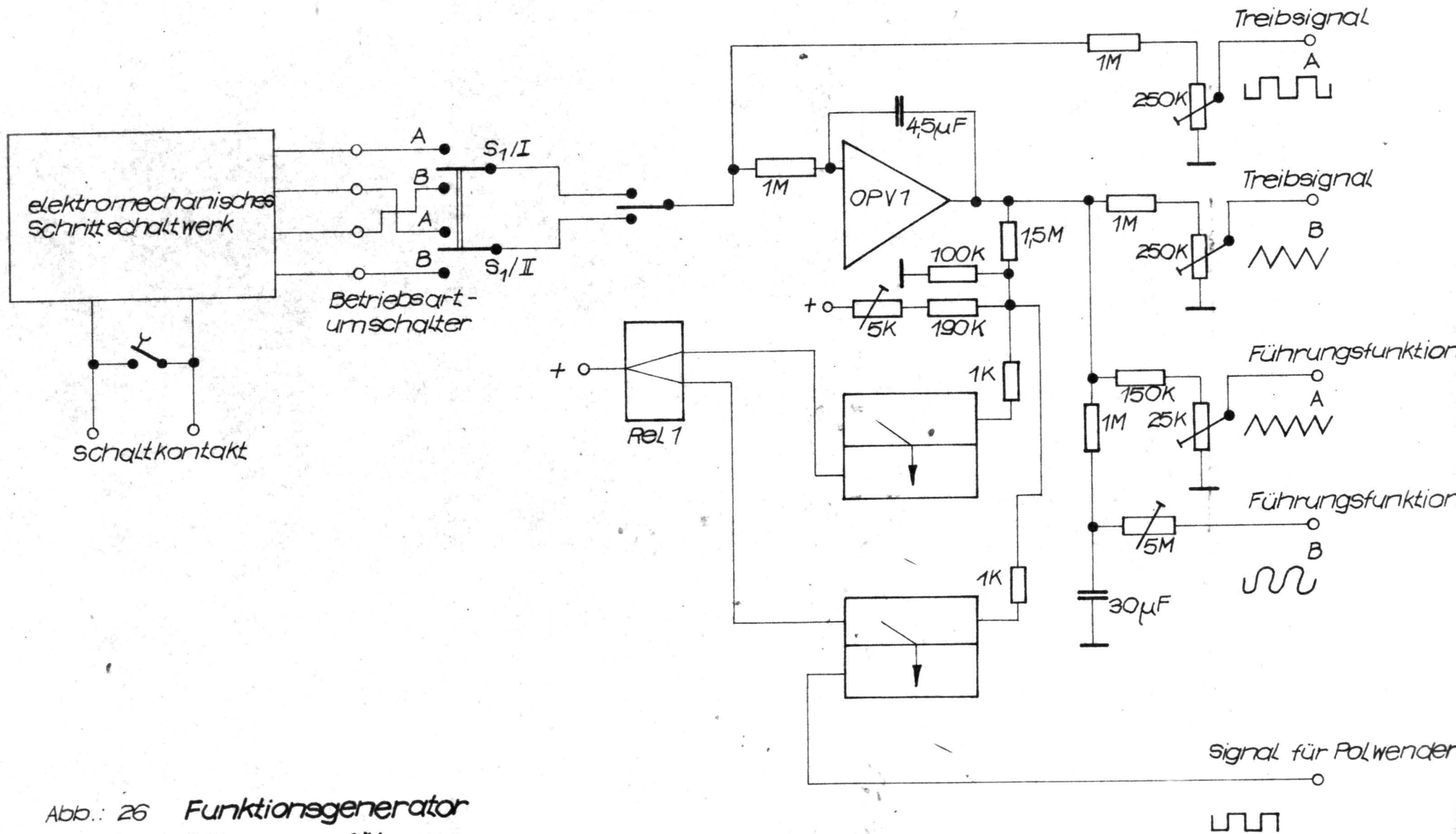


Abb.: 26 Funktionsgenerator
Röhrenaufbau

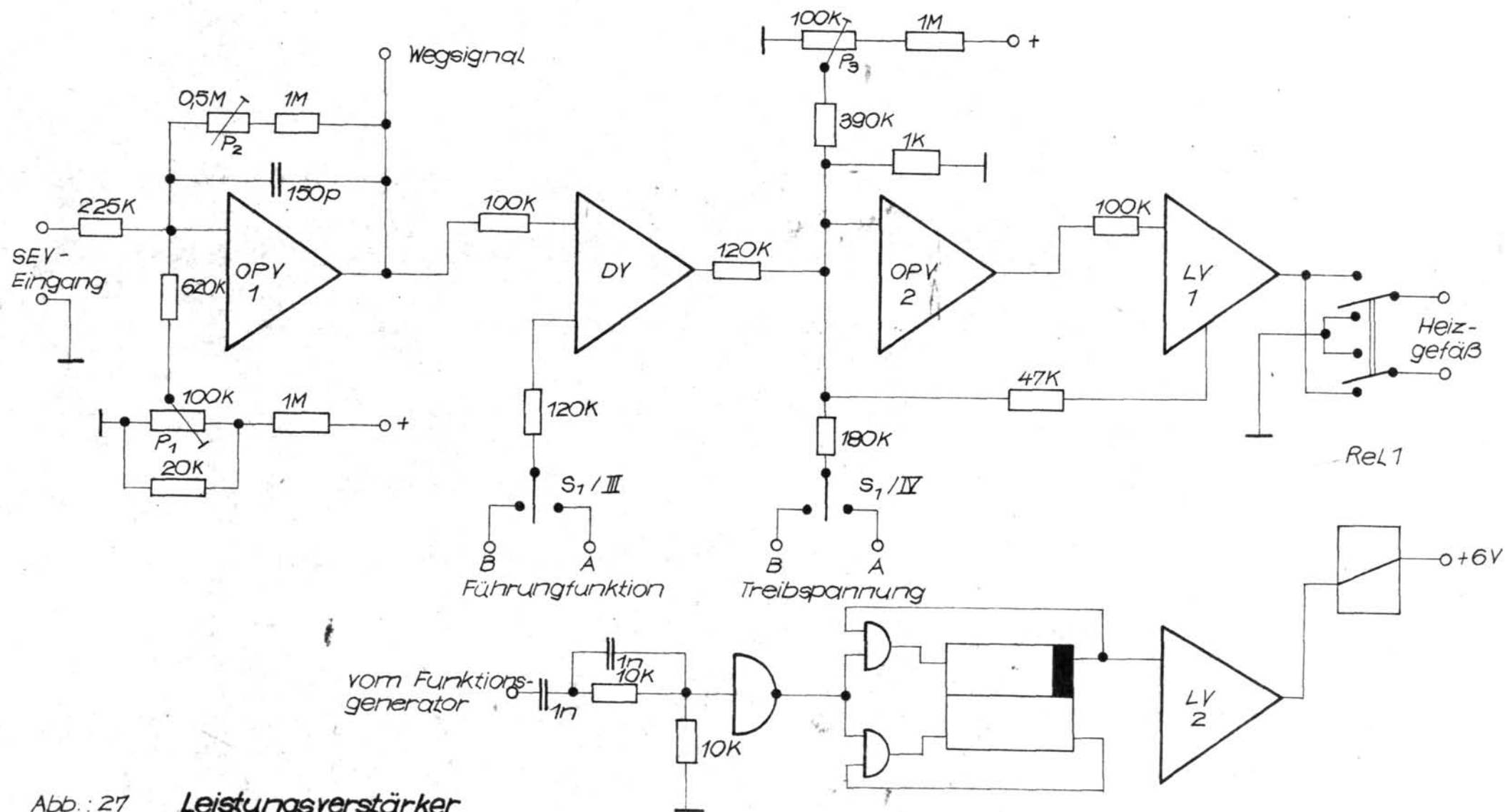


Abb.: 27

Leistungverstärker
Regelsignalverstärker
und Polwender

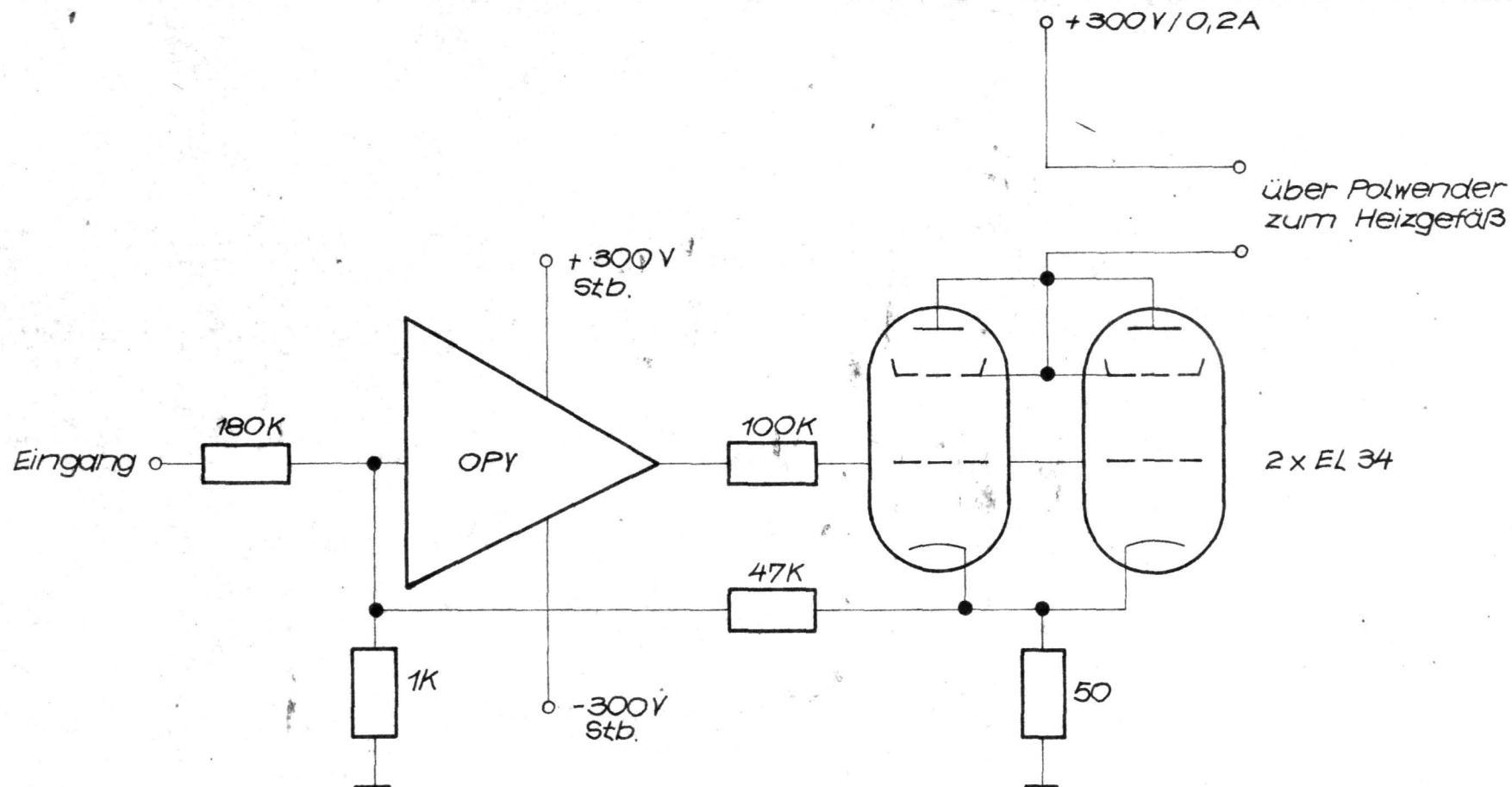
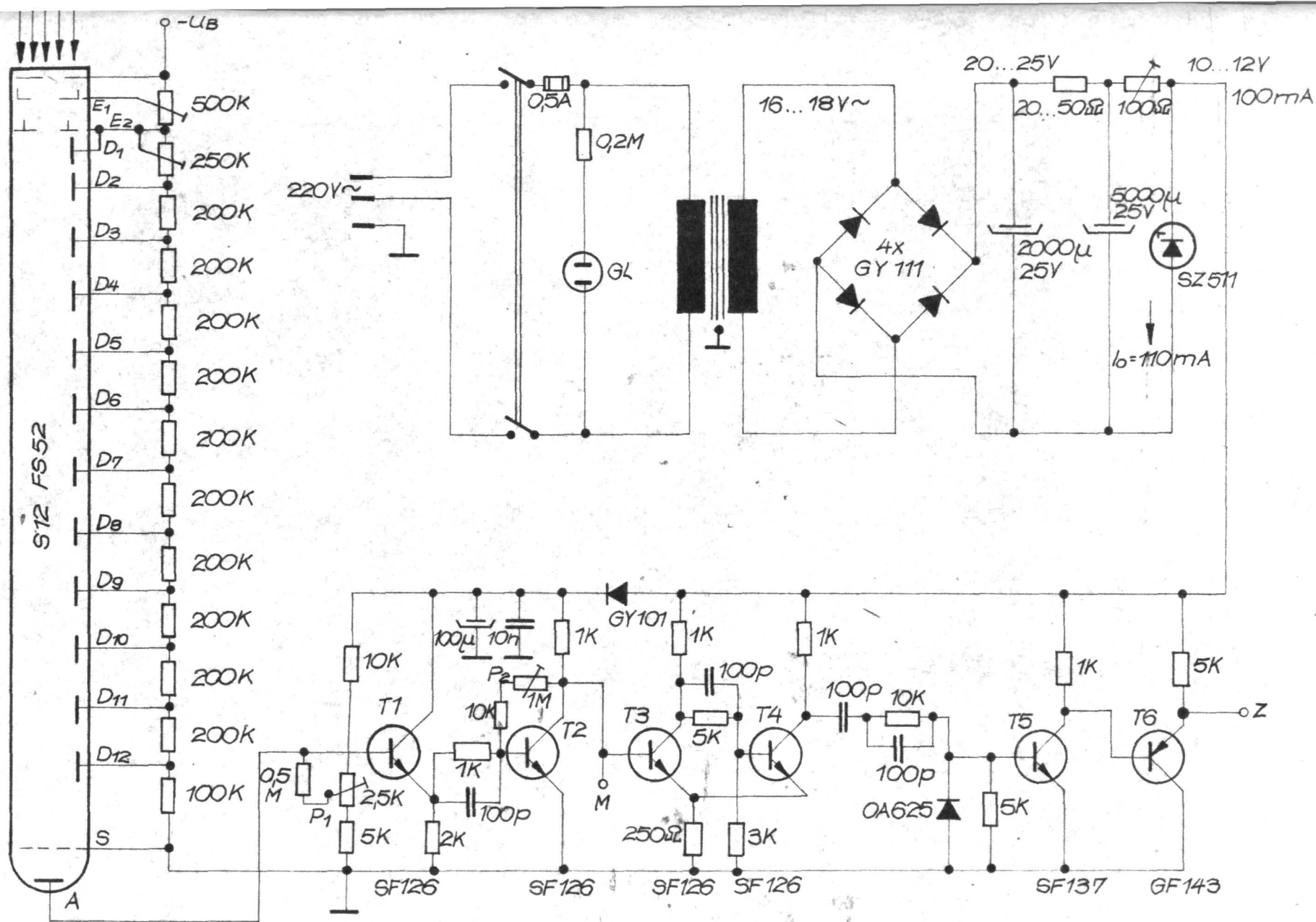
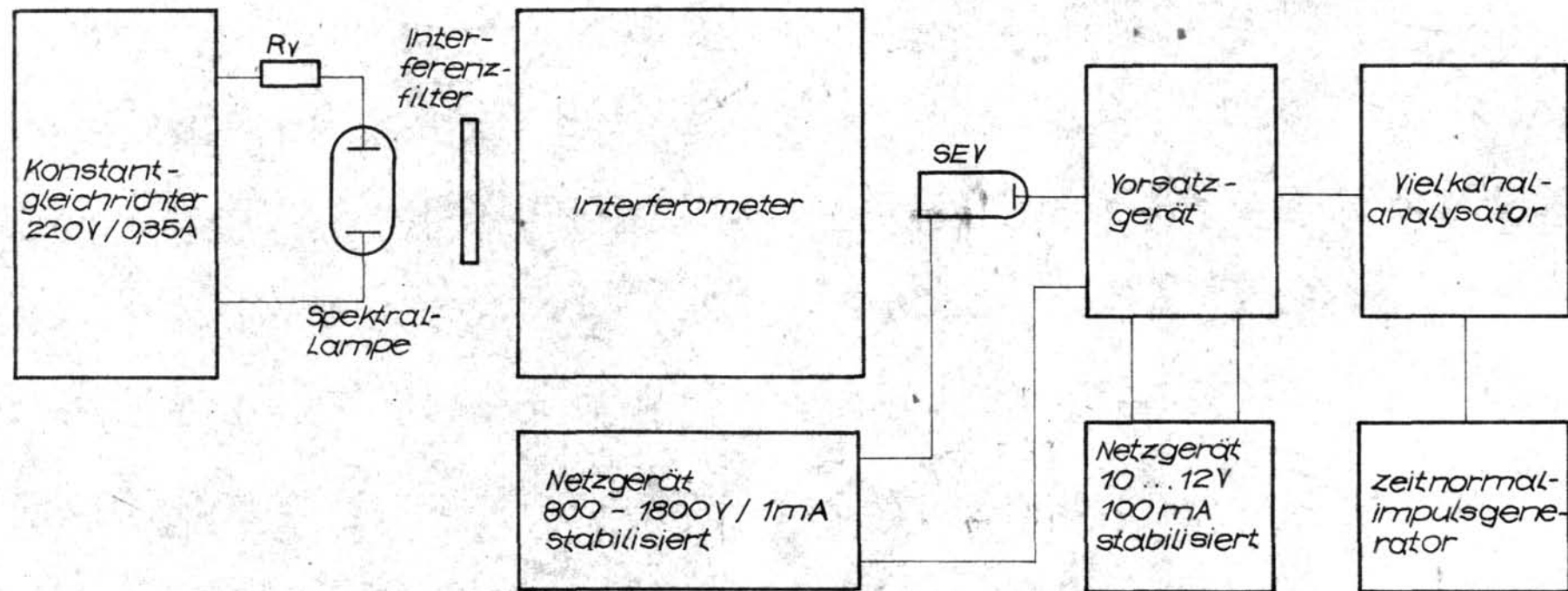


Abb.: 28 **Leistungsendstufe**



Anlage Abb.: 1 Vorsatzgerät



Anlage

Abb.: 2 **Blockschaltbild**
Elektronischer Interferenz-
Linienzähler